

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

Методичні вказівки
до лабораторних робіт
з навчальних дисциплін

«ОПІР МАТЕРІАЛІВ»
«ТЕХНІЧНА МЕХАНІКА» і
«ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА»

*(для студентів 2-3 курсів денної і заочної форм навчання бакалаврів за
напрямами підготовки 6.060101 - Будівництво, 6.060105 - Гідротехніка
(фахове спрямування «Водні ресурси»), 6.170202 - Охорона праці, 6.050702 -
Електромеханіка)*

Методичні вказівки до лабораторних робіт з навчальних дисциплін «Опір матеріалів», «Технічна механіка» і «Прикладна механіка» *(для студентів 2-3 курсів денної і заочної форм навчання бакалаврів за напрямками підготовки 6.060101 Будівництво, 6.060105 Гідротехніка (фахове спрямування «Водні ресурси»), 6.170202 Охорона праці, 6.050702 Електромеханіка)* / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова; уклад: М. А. Засядько, Н. В. Середа, В. П. Шпачук, О. М. Кузнецов.— Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. — 61 с.

Укладачі: М. А. Засядько, Н. В. Середа, В. П. Шпачук, О. М. Кузнецов

,

Рецензент О. О. Чупринін

Рекомендовано кафедрою теоретичної і будівельної механіки, протокол № 4 від 27.11.16 р.

ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 Машини і прилади для випробувань.....	5
1.1 Універсальна випробувальна машина УВМ-50.....	5
1.2 Механічна машина ВМ-4Р для випробувань на розтяг.....	6
1.3 Випробувальна машина АМ-1.....	8
1.4 Машина для випробувань на витривалість.....	8
1.5 Маятниковий копер.....	9
1.6 Важільний тензометр.....	10
1.7 Індикатор годинникового типу (прогиномір).....	12
2 Лабораторні роботи.....	13
2.1 Випробування сталевго нормального зразка на розтяг.....	13
2.2 Випробування сталі на стиск.....	17
2.3 Випробування чавуна на стиск.....	19
2.4 Випробування деревини на стиск.....	21
2.5 Випробування деревини на скіл.....	23
2.6 Визначення коефіцієнта поперечної деформації сталі.....	25
2.7 Визначення нормальних напружень уздовж висоти перерізу при згині балки прямокутного перерізу.....	27
2.8 Випробування сталевго циліндричного зразка на кручення.....	30
2.9 Випробування сталі на стомленість при змінних за знаком напруженнях.....	33
2.10 Визначення питомої ударної в'язкості сталі.....	37
Додаток А Журнали лабораторних робіт.....	40
Додаток Б Механічні характеристики матеріалів.....	58
Список рекомендованих джерел.....	60

ВСТУП

Опір матеріалів є наукою про інженерні методи розрахунку елементів споруд та машин на міцність, жорсткість і стійкість.

Найбільш важливим завданням опору матеріалів є виявлення причин та характеру руйнування конструкцій. Хоча це явище відоме здавна, його суть зрозуміла не повністю.

В опорі матеріалів тісно пов'язані теорія та експеримент, тому вивчення курсу опору матеріалів звичайно супроводжується роботами в механічній лабораторії. Вони дають базу при вивченні цієї дисципліни.

Роботи в лабораторії ставлять за мету:

- познайомити студентів з основними механічними характеристиками матеріалів;
- показати закони, що пов'язують між собою напруження та деформації;
- проілюструвати фізичну суть явищ при різних деформаціях;
- обґрунтувати ті гіпотези, на яких базуються теоретичні висновки опору матеріалів.

До механічних характеристик матеріалів, що визначають їхню здатність опиратися зовнішнім силам, відносяться:

- модуль пружності та коефіцієнт Пуассона;
- межа пружності;
- межа пропорційності;
- межа текучості;
- межа міцності (тимчасовий опір);
- межа стомленості (витривалості);
- опір ударним навантаженням;
- питома робота деформації та ін.

Характеристики, що визначають здатність матеріалів деформуватися при навантаженні, є такі:

- абсолютна й відносна деформації (лінійна й кутова);
- прогин і кут повороту перерізу;
- кут закручення;
- поперечна деформація.

У лабораторних роботах передбачено вивчення властивостей як металевих (сталь, чавун) і неметалевих (дерево).

Перш ніж приступити до виконання тієї чи іншої лабораторної роботи, студент повинен засвоїти теоретичний матеріал, познайомитись з описом машин та приладів для визначення напружень і деформацій під час випробувань. Схеми зразків, принципові схеми машин та приладів, дані попередніх обмірів і експериментів необхідно заносити в спеціально розроблений журнал.

1 МАШИНИ ТА ПРИЛАДИ ДЛЯ ВИПРОБУВАНЬ

1.1 Універсальна випробувальна машина УВМ-50

На цій машині передбачена можливість виконання випробувань на розтяг, стиск та згин при максимальному навантаженні 500 кН (50 тс). Схема машини наведена на рисунку 1.1. Машина складається з трьох основних вузлів: силовий агрегат, силовимірювач та робоча частина.

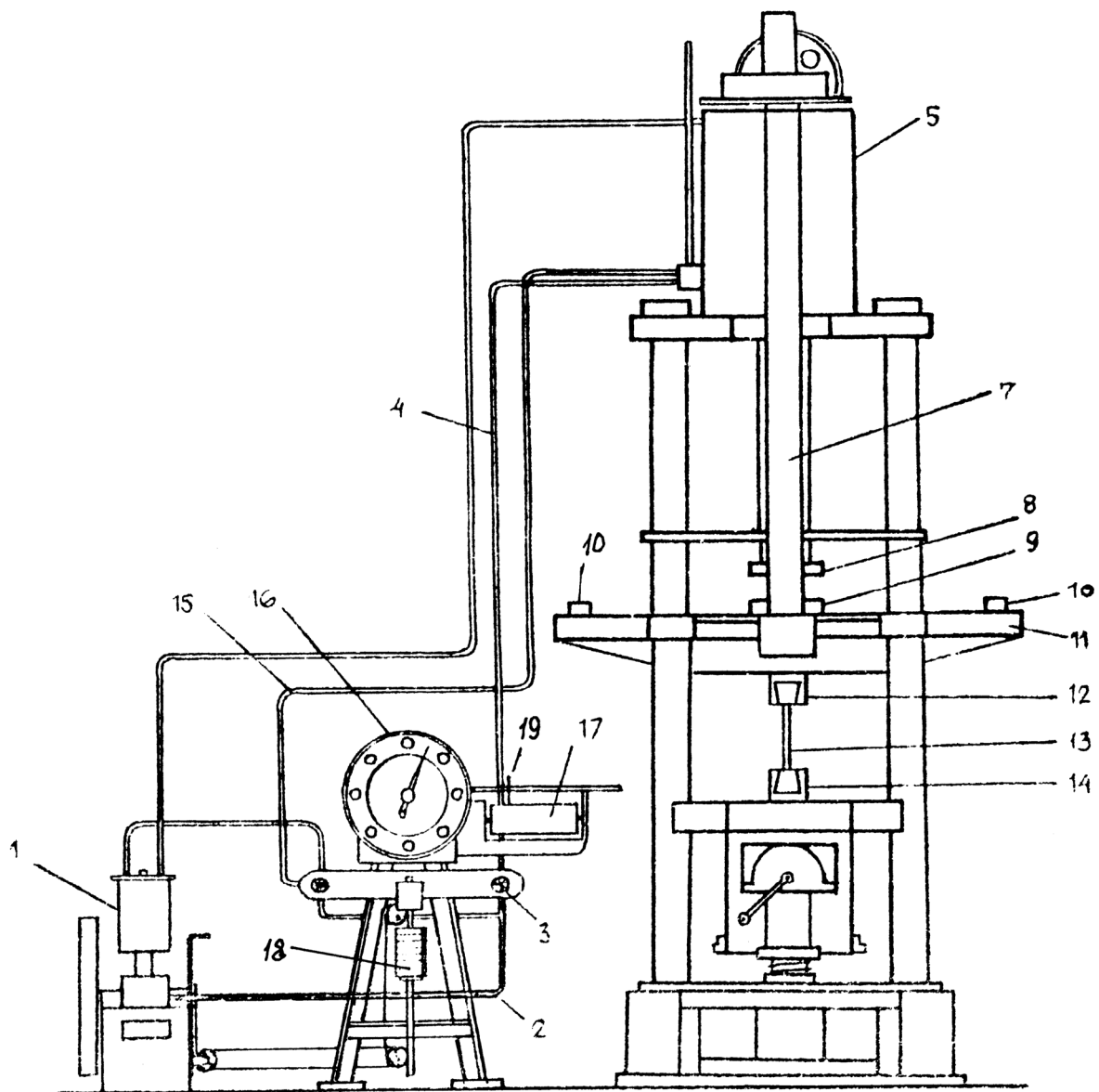


Рисунок 1.1.

Силовий агрегат являє собою гідравлічний насос 1, який приводиться до дії електричним двигуном. Силовий агрегат зв'язаний трубопроводами 2, 4, 15 з силовимірювачем та робочою частиною.

Силосимірювач складається з гідравлічного циліндра, шток якого через важіль з'єднаний з маятником (18). Маятник через зубчасту передачу пов'язаний зі стрілкою шкали (16) силосимірювача, а також через зубчасту рейку з олівцем (19), який зміщується уздовж осі барабана (17). Кут відхилення маятника, а отже й кут повороту стрілки на шкалі (16) та величина зміщення олівця на барабані (17) залежить від тиску рідини в циліндрі силосимірювача.

Робоча частина – це гідравлічний прес. Під тиском рідини поршень робочого циліндра (5) зміщується угору і піднімає через тяги (7) траверсу (11). При такому переміщенні між її захватом (12) та нижнім нерухомими захватом (14) станини здійснюється розтяг, а між упором (9) траверси та верхнім нерухомим упором (8) стиск. При випробуваннях на згин балку розміщують на верхніх опорах (10) траверси.

До траверси прикріплена нитка, другий кінець якої перекинутий через шків барабана (17) силосимірювача. Отже при переміщенні траверси барабан (17) повертається навколо своєї осі на відповідну величину.

При випробуваннях робоча рідина від насоса (1) через трубопровід (2), регулювальний вентиль (3) та трубопровід (4) подається до робочого циліндра (5). Поршень циліндра приходить в рух, приводячи до переміщення траверси (11). Отже здійснюється навантаження на зразок: стиск, або згин над траверсою чи розтяг – під нею. Величина навантаження визначається тиском рідини у робочому циліндрі. Завдяки трубопроводу (15), що з'єднує робочий циліндр та силосимірювач, означений тиск передається на циліндр силосимірювача. Отже залежно від тиску робочої рідини стрілка на шкалі (16) силосимірювача відображає величину навантаження. При цьому олівець (19) на барабані (17) креслить криву залежності між навантаженням і переміщенням траверси (подовженням або покоротшанням відповідно розташованого зразка).

1.2 Механічна машина ВМ-4Р для випробувань на розтяг

Машина ВМ-4Р призначена для випробувань матеріалів на розтяг. Максимальне зусилля, яке може бути досягнуто при випробуваннях, – 40 кН (4 тс).

Кінематична схема машини наведена на рисунку 1.2.

Зразок встановлюють у зачіпки (21), які можна змінювати залежно від форми та розмірів зразка. Швидке пересування нижньої зачіпки при встановленні зразка здійснюється вручну за допомогою маховика, закріпленого на верхній частині гвинта (7). Завантаження здійснюється від електродвигуна

(1) або вручну рукояткою (4). Рух від двигуна передається через систему черв'якових (13, 9) та зубчастих (12, 2) передач на гайку (10).

При обертанні гайки (10) гвинт (7) зміщується донизу. Закріплений у машині зразок з'єднує верхню і нижню зачіпки, за рахунок чого переміщення нижньої зачіпки викликає переміщення і верхньої зачіпки. Остання з'єднана з важелем (5), а через тягу (17) з маятником (3). Величина навантаження на зразок визначається відхиленням маятника (3) від вертикалі. Маятник з'єднаний важелем (18) з кареткою (14), яка пересувається уздовж шкали (6), відзначаючи відхилення маятника, а отже, і величину навантаження. Ціна поділки шкали становить 50 Н при одному вантажі на маятнику 3 і 100 Н при двох вантажах.

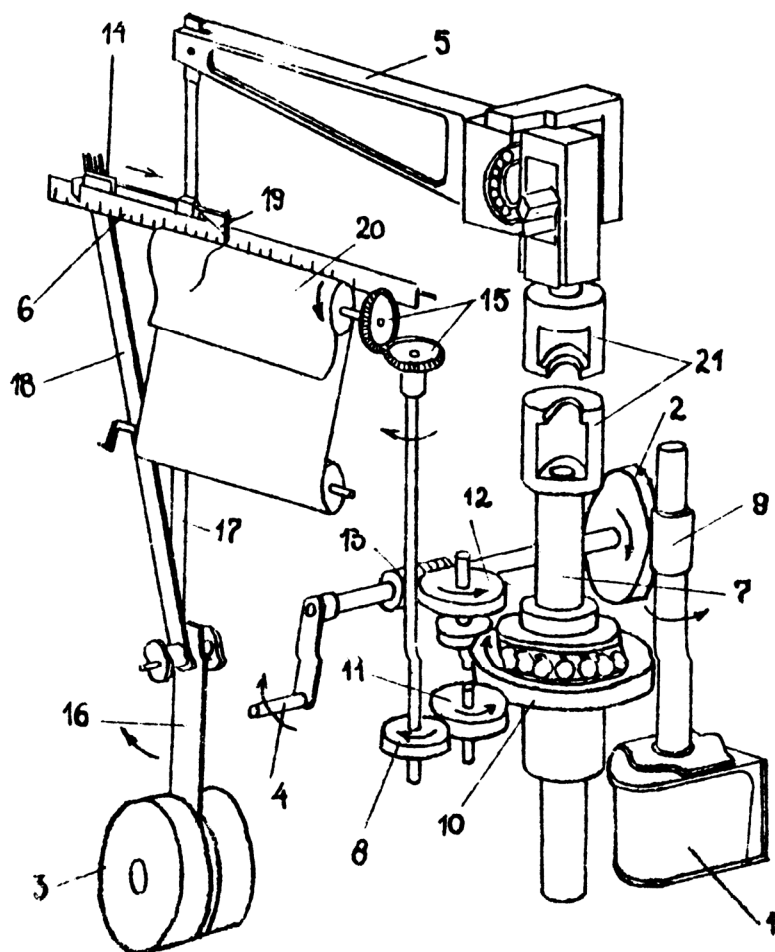


Рисунок 1.2

Машина має діаграмний пристрій, який дозволяє автоматично реєструвати результати випробувань. Олівець (19), закріплений у каретці (14), рухається вздовж барабана (20), оберненого міліметровим папером. Кут оберту барабана залежить від переміщення нижньої зачіпки (21), з якою він зв'язаний

системою передач (8) та (15). Отже при випробуваннях на папері викреслюється графік залежності подовження зразка від навантаження.

1.3 Випробувальна машина АМ-1

Машина АМ-1 призначена для проведення випробувань на кручення.

Схема машини наведена на рисунку 1.3.

Зразок (2) закріплюють у зачіпках (1) машини. Прикладення крутного моменту здійснюється за допомогою рукоятки (3) силозбуджувача та зубчастої передачі. Права зачіпка при цьому обертається, викликаючи поворот лівої зачіпки, а отже і відхилення маятника (4) з вантажем Q . Відхилення маятника від вертикалі визначає величину крутного моменту M_k . Маятник через систему передач (6) зв'язаний із стрілкою шкали (5) силовимірювального пристрою, на якому реєструється величина M_k . Машина обладнана діаграмним пристроєм, на барабані (7) якого викреслюється крива залежності кута закручення від величини крутного моменту.

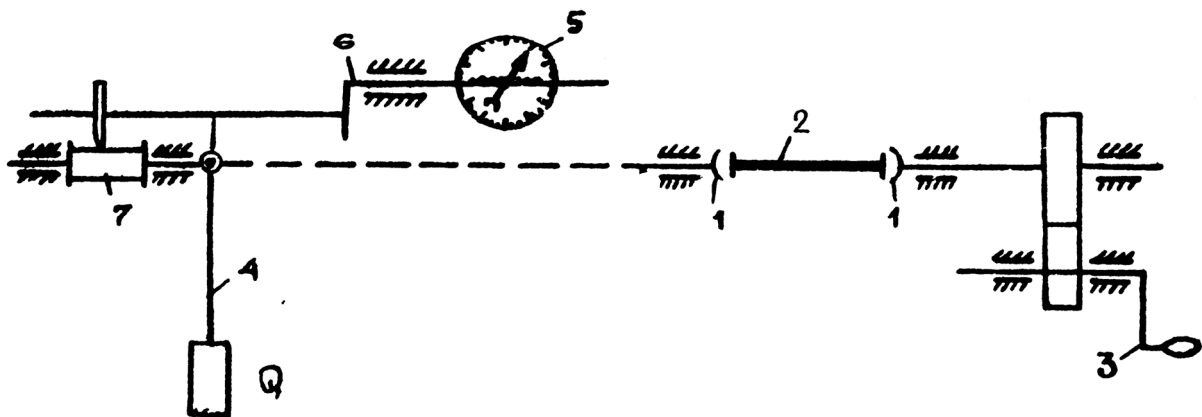


Рисунок 1.3.

1.4 Машина для випробувань на витривалість

Випробування на витривалість проводять на машині, схема якої наведена на рисунку 1.4.

Зразок (1) встановлений в нерухомих підшипниках (2). Навантаження F передається на зразок через систему важелів та плаваючі підшипники (4). Електродвигун (5) через редуктор (7) та зачіпку (8) передає обертання на зразок. Оскільки площа навантаження залишається вертикальною, то при

обертанні кожен переріз зразка зазнає змінних за величиною та знаком напружень. Кількість обертів, тобто кількість циклів завантаження, фіксується лічильником.

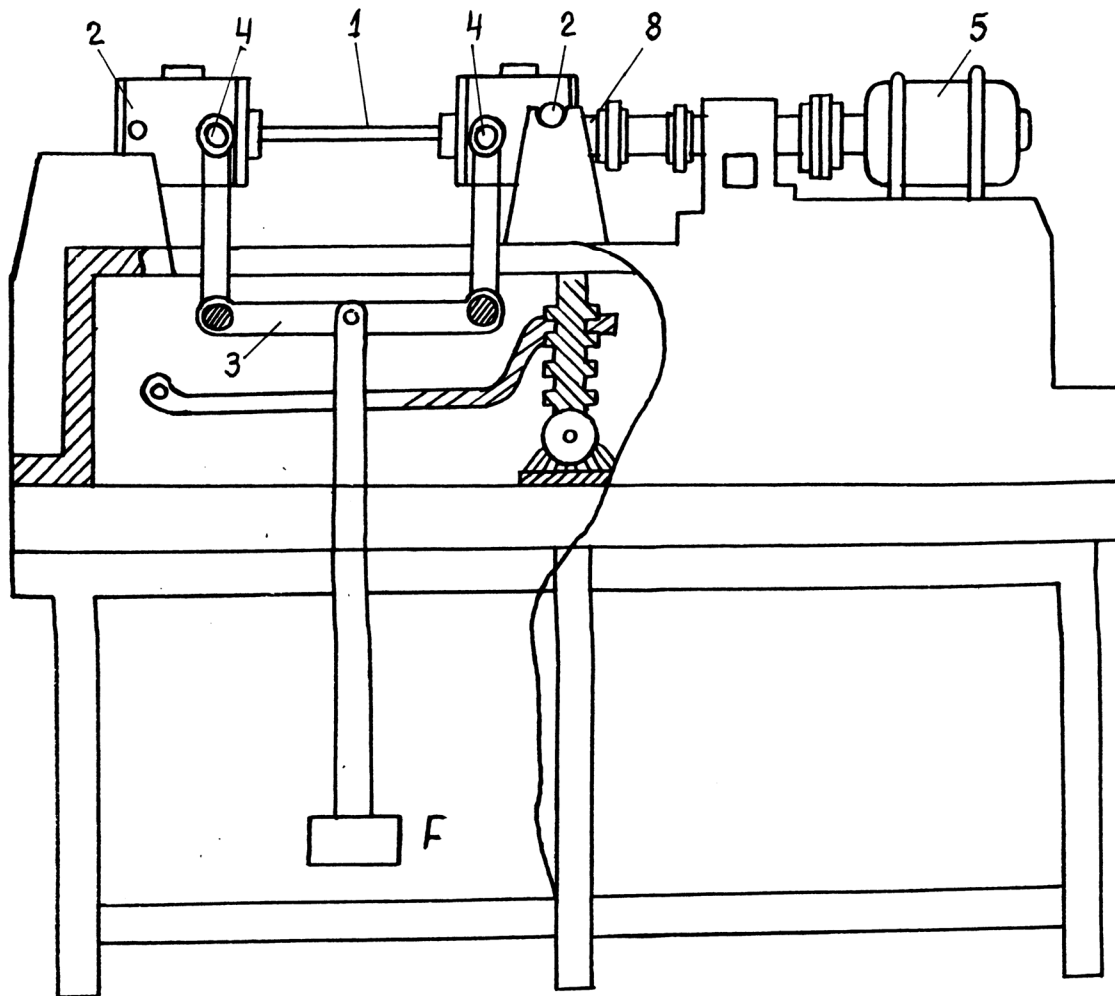


Рисунок 1.4.

При руйнуванні зразка електродвигун автоматично вимикається.

1.5 Маятниковий копер

Копер призначений для випробувань на ударну в'язкість матеріалів.

Схема копра наведена на рисунку 1.5

Машина має чавунну основу (1), на якій закріплені загартовані опори (2). На основі змонтовані два стояки (3), між якими закріплена вісь (4) маятника (5) з молотом (6). Маятник має пристрій, що дозволяє встановити його на певний кут зарядження (на певну величину H). Зразок (7) при випробуванні кладуть на опори (2). Реєструючий пристрій (8) копра влаштований так, що його показчик

відзначає на шкалі різницю між висотою H маятника у вихідному положенні та висотою h після руйнування зразка.

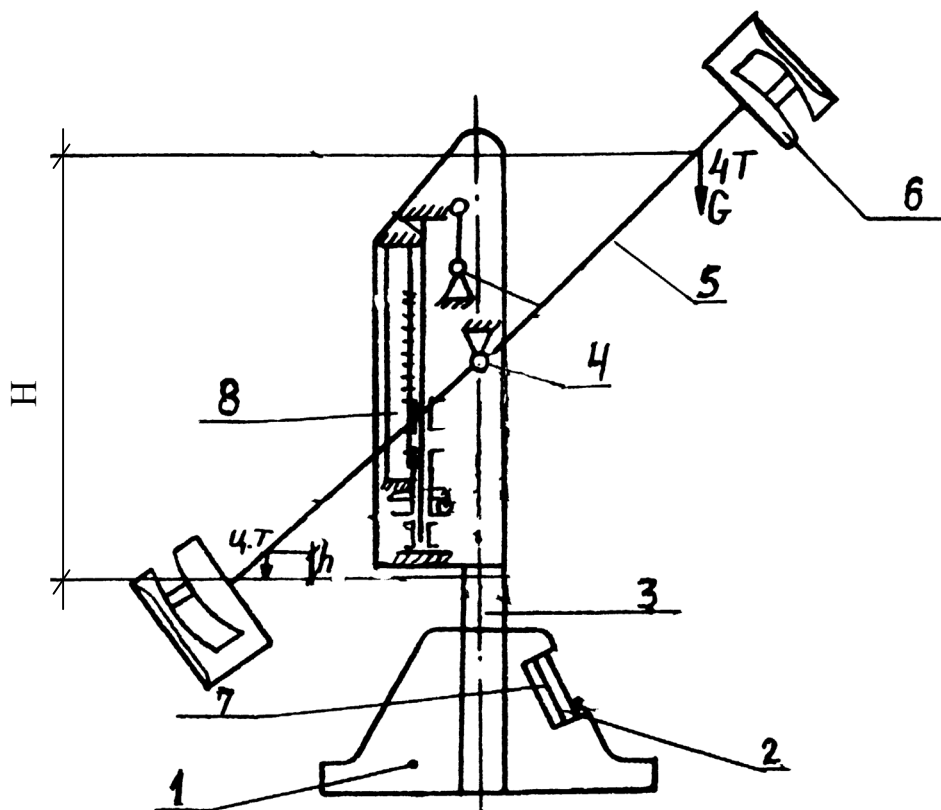


Рисунок 1.5.

Маятник вагою G , піднятий на величину H , має певний запас енергії. При своєму падінні він витрачає частину енергії на руйнування зразка і, отже після проходження вертикалі підніметься на меншу величину h . Різниця $H - h$ визначає роботу, витрачену на руйнування зразка:

$$A = G(H - h).$$

1.6 Важільний тензометр

Тензометри, зокрема важільний тензометр Гугенбергера, є приладами, призначеними для вимірювання деформацій.

Важільний тензометр (рис. 6) являє собою прилад, що працює за принципом механічного відліку подовжень.

Коефіцієнт збільшення тензометра:

$$K = \frac{H}{R_2} \cdot \frac{R_1}{a}.$$

Станина (1) приладу має дві гострі ніжки: нерухому (2) й рухому (3) у вигляді призми, що хитається. Відстань між ніжками називають базою приладу ℓ . З рухомою призмою (3) жорстко зв'язаний важіль (4), інший кінець якого шарнірною тягою 5 з'єднується зі стрілкою приладу.

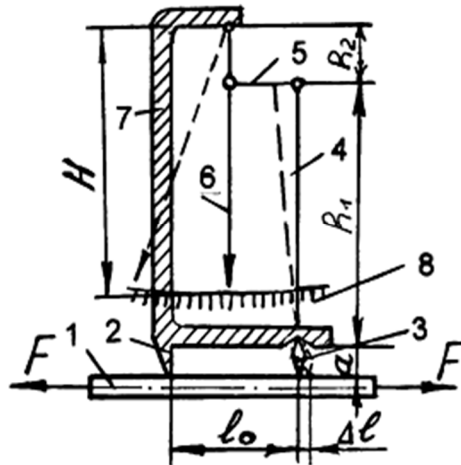


Рисунок 6

При подовженні бази тензометра на величину $\Delta \ell$ призма (3) разом з важелем (4) нахилиється, кінець важеля зміщується в положення і кінець тяги (5) відхиляє стрілку приладу. Різниця відліків λ пропорційна подовженню бази $\Delta \ell$.

Зазвичай поділка шкали 8 становить 1 мм, а розміри a , H , R_1 , R_2 підбирають так, щоб коефіцієнт збільшення K був у межах 1000... 1200.

Значення коефіцієнта збільшення тензометра наведено в паспорті приладу. Отже знаючи K , за різницею відліків λ легко визначити подовження:

$$\Delta \ell = \lambda / K.$$

Для закріплення важільної системи в нерухомому стані тензометр має аретир – фіксуючий важіль.

Правила роботи з тензометром

1. Перед встановленням приладу на конструкцію металеві поверхні зачищають, на деревині ставлять спеціальні кнопки, бетонні поверхні по можливості згладжують або вирівнюють рідким цементом.

2. Тензометр ставлять на відповідне волокно із закритим аретиром і міцно закріплюють струбицею. При цьому площа тензометра повинна бути перпендикулярною до поверхні зразка.

3. Після встановлення приладу аретир відпускають, а стрілку в положення початкового відліку підводять регулювальним гвинтом. Цим же гвинтом стрілку переводять у протилежний бік шкали, якщо під час випробувань стрілка дійде до кінця шкали й останньої не буде діставати для продовження відліків.

4. Відліки починають з деякого навантаження для того, щоб рухомі частини приладів були налаштовані на переміщення у певному напрямку і вплив вільних рухів був виключений.

5. При відліках слідкують за тим, щоб стрілка та її зображення у дзеркалі шкали співпадали. Відліки беруть з точністю до 1 поділки.

1.7 Індикатор годинникового типу (прогиномір)

Індикатор годинникового типу (прогиномір) (рис. 1.7) призначений для вимірювання лінійних переміщень.

У напрямних корпусу (1) лінійно переміщується шток (2). Він має рейкову різьбу і зчеплення з шестернею, на осі якої нерухомо закріплені стрілка (3). Обертання цієї шестерні передається на вал з меншою стрілкою (5). При переміщенні штока (2) шестерні разом зі стрілками (3, 5) обертаються.

Індикатор має дві шкали: велику й малу. Велика шкала (4), вздовж якої рухається стрілка (3), відповідає переміщенням штифта від 0 до 1,0 мм і має 100 поділок. Отже одна поділка відповідає переміщенню штифта на 0,01 мм, а повне обертання стрілки (3) здійснить при переміщенні штифта на 1 мм. На малій шкалі стрілка (5) фіксує кількість повних обертів стрілки (3).

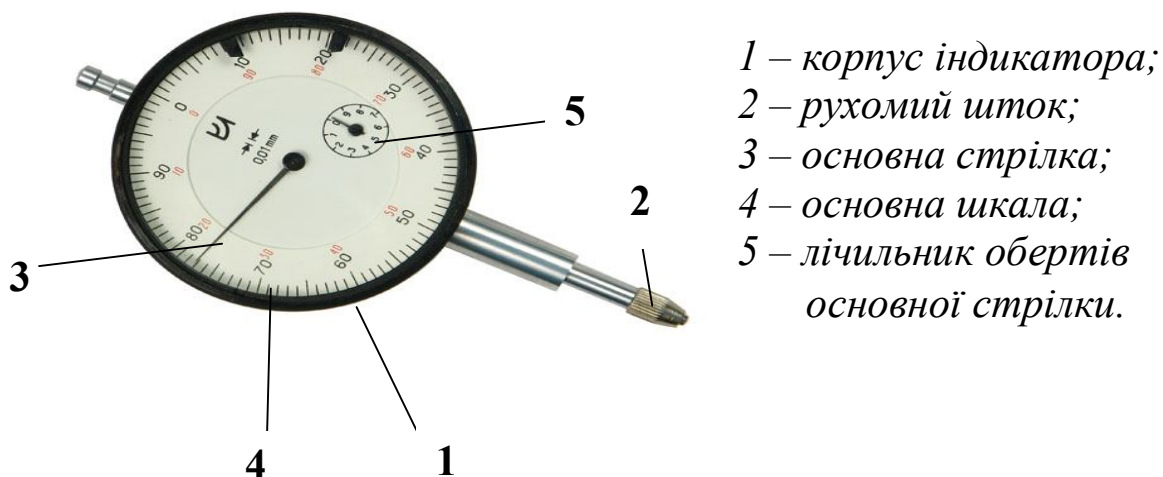


Рисунок 1.7

При вимірюванні переміщень індикатор встановлюють так, щоб кінець штифта 3 опирався в точку поверхні, переміщення якої вимірюється. У такому положенні з допомогою спеціальних кронштейнів та струбцин корпус індикатора закріплюється нерухомо. Завдяки пружині кінець штифта весь час притиснутий до точки поверхні і при її переміщенні прямує за нею.

2 ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ

2.1 Випробування сталевго нормального зразка на розтяг

Мета роботи – одержання діаграми розтягу сталевго зразка, ознайомлення з методикою одержання механічних характеристик матеріалів на прикладі 13абл.13углецевої сталі і визначення марки сталі за одержаними характеристиками міцності й пластичності.

За даними випробувань необхідно визначити:

- межу текучості σ_t ;
- межу міцності розриву σ_{max} ;
- абсолютне подовження розрахункової довжини $\Delta \ell$;
- відносне подовження ε ;
- вдносне звуження після розриву ψ ;
- площу діаграми розтягу S ;
- повну роботу, що витрачена на розрив W ;
- питому роботу деформації w ;
- міру заповнення діаграми η ;
- марку сталі.

Машини та прилади для випробувань

Роботу виконують на універсальній випробувальній машині УВМ-50 (п. 1.1). Вимірювання розмірів зразка виконують за допомогою штангенциркуля.

Зразок для випробування

Як показали експерименти, межа міцності матеріалу не залежить від довжини й форми перерізу зразка.

При випробуваннях на розтяг для досягнення порівнюваних між собою результатів використовують нормальні циліндричні зразки семи типів і плоскі зразки двох типів. Тип зразка визначається конструкцією його кінцівок.

У цій роботі використовується циліндричний зразок IV типу (рис. 2.1).

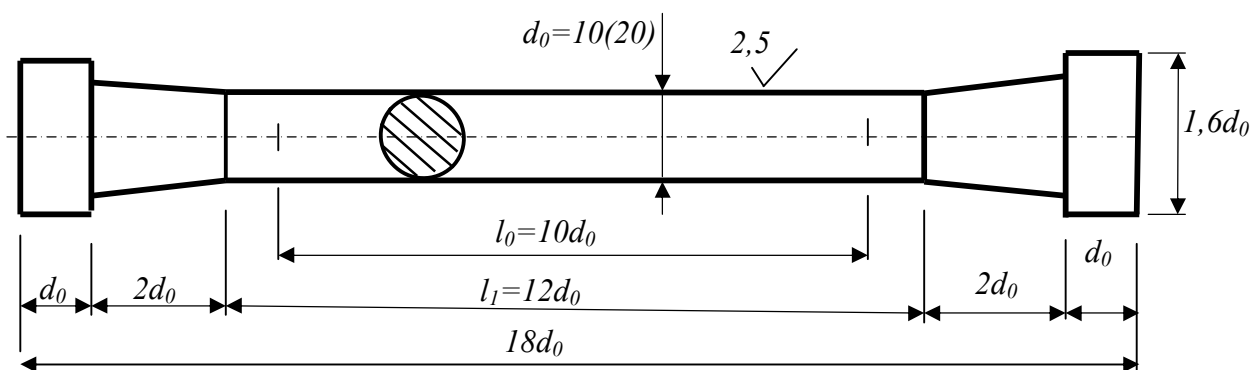


Рисунок 2.1

Розрахункова довжина ℓ_0 на зразках помічається рисками. Ця довжина повинна бути меншою, ніж відстань між кінцівками, щоб виключити вплив способу прикладання зовнішніх сил і концентрації напружень в місцях зміни перерізу. Зона цього впливу на підставі принципу Сен-Венана не перевищує меншого розміру перерізу.

Основні відомості з теорії

Особливості поведінки зразка при випробуванні на розтяг наочно ілюструються діаграмою розтягу – графіком залежності між навантаженням F та абсолютним подовженням $\Delta\ell$. Для 14абл.14углецевої сталі вона має вигляд, наведений на рисунку 2.2.

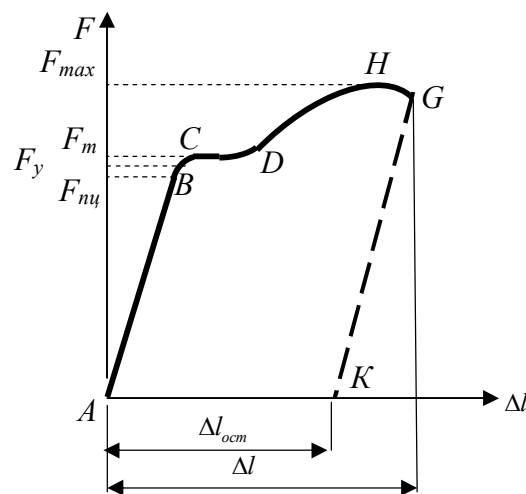


Рисунок 2.2

На цій діаграмі можна виокремити три ділянки: лінійна AB ; горизонтальна CD та нелінійна DHG .

На ділянці AB подовження $\Delta\ell$ пропорційне навантаженню F , тобто дійсний закон Гука. Величина $F_{ну}$ визначає навантаження, що відповідає межі пропорційності. Дуже близьке до нього значення F_y , яке визначає межу пружної роботи матеріалу.

На ділянці CD подовження $\Delta\ell$ зростають при незмінному навантаженні F_m . Таке явище, характерне для пластичних матеріалів, називається текучістю, а F_m – навантаження, що відповідає межі текучості матеріалу.

Коли зона текучості минає, навантаження знову зростає до F_{max} , після чого стрімко падає до миті розриву зразка (т. G). F_{max} – навантаження, що відповідає межі міцності матеріалу (тимчасовому опору).

Діаграма розтягу будується для даного зразка і її масштаб залежить від розмірів останнього. Тому на основі цієї діаграми будують діаграму напружень – залежність між напруженнями $\sigma = \frac{F}{A_0}$ та відносним подовженням $\varepsilon = \frac{\Delta \ell}{\ell_0}$.

Ця діаграма є характеристикою матеріалу безвідносно до розмірів зразка. На діаграмі напружень зберігаються всі характерні точки діаграми розтягу.

Падіння навантаження після досягнення F_{max} обумовлене тим, що в цей час на зразку утворюється місцеве звуження – так звана шийка (рис. 2.3). В результаті цього несуча здатність зразка знижується. На рисунку 9 d – діаметр шийки.

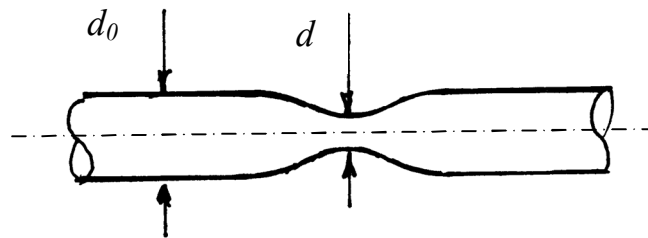


Рисунок 2.3

Послідовність виконання роботи

За допомогою штангенциркуля вимірюють діаметр d_0 та розрахункову довжину ℓ_0 зразка, після чого закладають його в зачіпки машини УВМ-50.

Перед початком випробувань проводять попередній натяг, щоб виключити вплив люфтів та сковзання зразка в зачіпках. Далі виставляють на барабан діаграмного апарата олівець і створюють зростаюче навантаження F , доводячи зразок до розриву.

Упродовж експерименту на силовій шкалі машини відзначають навантаження F_m , що відповідає межі текучості та F_{max} . Навантаження F_m відповідає тій стадії навантаження, коли при зупиненні збільшення зусилля відзначається зростання деформацій. Значення F_m та F_{max} одержують також за діаграмою, записаною на машині УВМ-50. На діаграмі вимірюють її площу S .

Після розриву зразка його частини виймають з машини і вимірюють довжину розрахункової частини ℓ та діаметр зразка в зоні розриву – діаметр шийки d .

Далі за одержаними даними випробувань виконують обчислення:

-площа перерізу зразка до випробувань

$$A_0 = \frac{\pi d_0^2}{4};$$

-площа шийки зразка (в місці розриву)

$$A = \frac{\pi d^2}{4};$$

-межа текучості матеріалу $\sigma_m = F_m / A_0$;

-межа міцності $\sigma_{max} = F_{max} / A_0$;

-абсолютне подовження $\Delta\ell = \ell - \ell_0$ (ℓ - довжина розрахункової частини зразка після розриву);

-відносне подовження $\varepsilon = \Delta\ell / \ell_0$;

-коефіцієнт звуження шийки $\psi = \frac{A_0 - A}{A_0}$;

-робота, витрачена на розрив зразка $W = S \cdot m \cdot n$ (S – площа діаграми розтягу, m та n – масштаби сил та переміщень, які наведені в паспорті машини);

-питома робота деформації $w = \frac{W}{A_0 \ell_0}$;

-межа заповнення діаграми $\eta = \frac{W}{F_{max}(\ell - \ell_0)}$.

Маючи межу міцності, відносне подовження і межу текучості, визначають марку сталі зразка (див. 16абл.. 1 додатку).

Контрольні запитання

1. Яка мета роботи?
2. Які параметри характеризують міцність матеріалу?
3. Які параметри характеризують пластичність матеріалу?
4. Назвіть характерні точки діаграми розтягу?
5. Які деформації мають місце в процесі деформації зразка до руйнування?
6. Як за даними випробувань визначають марку матеріалу?
7. Яке призначення має машина УВМ-50?
8. Який принцип роботи машини УВМ-50?

2.2 Випробування сталі на стиск

Мета роботи: вивчення властивостей пластичних матеріалів при стиску і визначення їхніх механічних характеристик.

Випробувальна машина. Випробування проводять на випробувальній машині УВМ-50 (п. 1.1).

Зразок для випробувань

Для випробування використовують зразок у вигляді циліндра з відношенням висоти до діаметра $\frac{h}{d} = 1 \dots 3$. Стиск проводять центральним навантаженням паралельно осі зразка. На міцність та характер деформацій впливають сили тертя, що діють у площинах контакту між торцями зразка і опорними плитами машини. Якщо змастити торці зразка для зменшення сил тертя, величина межі міцності виявляється меншою, ніж при відсутності мастила. Щоб одержати порівнювані результати, наявність чи відсутність змащування необхідно зазначати. Сили тертя протидіють деформації зразка у поперечному напрямку. Вплив цих сил зменшується при віддаленні від торців до середини. Через це зразок при стиску стає бочкоподібним (рис. 2.4).

Враховуючи вплив сил тертя на результати експерименту, не рекомендується вживати дуже короткі зразки. Не слід застосовувати також довгі зразки, оскільки внаслідок навіть незначних ексцентриситетів прикладання навантаження крім стиску з'являється згин. При збільшенні довжини зразка зростає і вплив згину.

Основні відомості з теорії

При стиску зразок вкоротшується і розширюється замість подовження та звуження при розтягу. Всі механічні характеристики матеріалів зберігають ті самі визначення та позначення, що й при розтягу.

Отже, відносне покоротшання

$$\varepsilon = \frac{h_0 - h}{h_0},$$

де h_0 та h - висота зразка відповідно до та після експерименту.

Відносне поперечне розширення

$$\psi = \frac{A - A_0}{A_0},$$

де A та A_0 - площа перерізу зразка відповідно після та до експерименту.

З діаграми стиску м'якої сталі (рис. 2.5) видно, що в початковому періоді завантаження, як при розтягу, має місце пропорційність між силою та деформацією. Після досягнення навантаження, що відповідає межі пропорційності, лінійна залежність порушується: деформації зростають швидше, ніж навантаження. При подальшому збільшенні стискуючої сили зростання деформацій поступово стає повільним за рахунок збільшення перерізу зразка. Оскільки зразок під дією зростаючого навантаження поступово розплющується, визначити руйнующе навантаження неможливо. Тому випробування переривають при деякому навантаженні F_{max} , обмежуючись вивченням поведінки та характеру деформацій пластичної сталі при стиску.

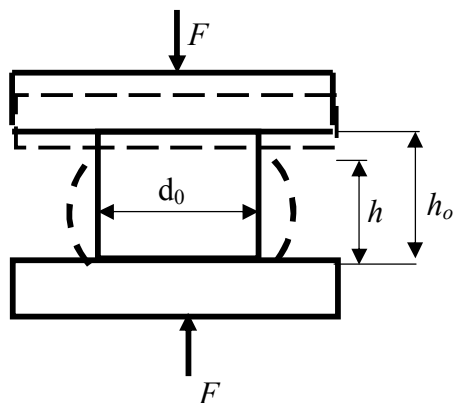


Рисунок 2.4

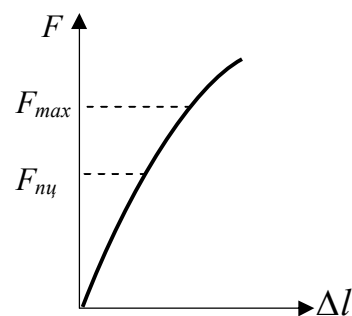


Рисунок 2.5

Визначення напружень за формулою

$$\sigma_{max} = \frac{F_{max}}{A_0}$$

дає дуже умовні величини через неоднаковість перерізів зразка вздовж висоти.

Межу пропорційності при стиску можна визначити так само, як і при розтягу:

$$\sigma_{пч} = \frac{F_{пч}}{A_0}.$$

Послідовність виконання роботи

Перед початком випробувань заміряють діаметр перерізу та висоту сталевго зразка.

Зразок розміщують між стискуючими площинами випробувальної машини та проводять його поступово зростаюче навантаження. Одночасно спостерігають деформації зразка. Коли стискуюча сила досягає 350... 400 кН, випробування переривають.

Вимірюють діаметр та висоту зразка після деформації.

Обчислюють нормальне напруження сталі при максимальному навантаженні.

Результати замірів та обчислень заносять у журнал спостережень.

Контрольні запитання

1. Яка мета лабораторної роботи?
2. Яка форма перерізу зразка для випробувань?
3. Яке відношення висоти до діаметру перерізу повинен мати зразок?
4. Який вигляд має діаграма стиску?
5. Чи впливають сили тертя між торцями зразка та опорними плитами на форму деформування зразка і результати випробувань?
6. За якою формулою обчислюють межу пропорційності сталі при стиску?
7. Яка розмірність умовної межі міцності й межі пропорційності сталі?
8. Якої форми набуває зразок при стиску?
9. За якими формулами визначають відносне покоротшання та відносне розширення зразка?

2.3 Випробування чавуна на стиск

Мета роботи: вивчення властивостей крихких матеріалів при стиску та визначення межі міцності чавуна.

Випробувальна машина

Експеримент виконують на випробувальній машині УВМ-50.

Зразок для випробувань

Випробування чавуна на стиск звичайно проводять на зразках циліндричної форми з відношенням висоти до діаметра у межах $h/d = 1...2$ (рис. 2.6).

Для таких крихких матеріалів, як камінь та бетон звичайно зразок беруть у вигляді куба.

Основні відомості з теорії

Крихкі матеріали (чавун, камінь, бетон та ін.) на стиск працюють значно краще, ніж на розтяг, тому вони використовуються саме в стиснутих елементах споруд. Отже випробування на стиск для таких матеріалів є основними.

На початку дії навантаження діаграма стиску чавунного зразка дуже близька до прямої (рис. 2.7). Відхилення її від осі F мале. Точна пропорційність між навантаженнями та покоротшаннями відсутня, тобто закон

Гука в цьому випадку не діє. Однак в межах тих напружень, при яких матеріал звичайно застосовується в конструкціях, відхилення від закону Гука незначне і на практиці ним нехтують.

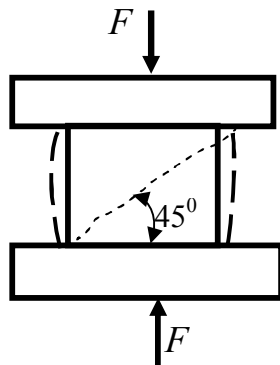


Рисунок 2.6

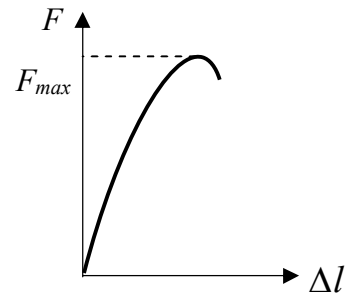


Рисунок 2.7

При збільшенні навантаження діаграма суттєво викривляється, зростання деформацій випереджає зростання навантаження. Руйнування зразка відбувається миттєво при достатньо значному навантаженні F_{max} . Руйнування відбувається вздовж похилих площин, кут яких з віссю зразка складає $45^\circ \dots 50^\circ$. Цей кут нахилу площин руйнування близький до кута нахилу найбільших дотичних напружень.

Стиснутий зразок дещо змінює попередню циліндричну форму на бочкоподібну, що свідчить про наявність невеликих пластичних деформацій (значно менші, ніж у сталі).

Межу міцності чавуна визначають за відомою формулою

$$\sigma_{max} = F_{max} / A_0.$$

Відзначимо, що діаграми стиску і розтягу крихких матеріалів мають однакову форму, але межа міцності при стиску (500... 1000 МПа) в декілька разів перевищує межу міцності при розтягу (210... 320 МПа).

Послідовність виконання роботи

Після вимірювання зразок встановлюють між стискуючими площинами машини і проводять його стиск до руйнування. Значення навантаження F_{max} , при якому відбулося руйнування, заносять в журнал спостережень.

Обчислюють межу міцності чавуна на стиск і за таблицею Б.2 додатку Б визначають марку чавуна.

Контрольні запитання

1. Яка мета лабораторної роботи?
2. Яка форма перерізу зразка для випробувань?

3. Який вигляд має діаграма стиску чавуна?
4. Для яких матеріалів випробування на стиск має важливе практичне значення?
5. Як відрізняються діаграми стиску чавуна та сталі?
6. Чому руйнування зразка відбувається вздовж площин, нахилених під кутом 45° до його осі?
7. За якою формулою визначають межу міцності чавуна при стиску?

2.4 Випробування деревини на стиск

Мета роботи: вивчення властивостей деревини при стиску її вздовж та поперек волокон, визначення межі міцності.

Випробувальна машина

Експеримент виконують на випробувальній машині УВМ-50.

Зразок для випробувань

Для випробувань деревини на стиск у цій роботі беремо кубики з сосни розміром 50х50х50 мм.

Основні відомості з теорії

Однією з механічних характеристик деревини є опір її стиску.

Величина опору деревини перш за все залежить від того, як спрямоване навантаження відносно напрямку волокон: уздовж (рис. 2.8) або поперек (рис. 2.9).

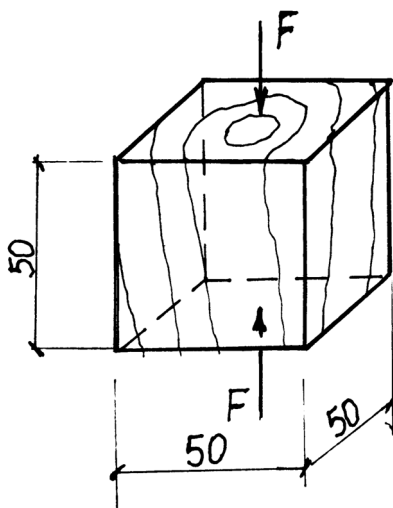


Рисунок 2.8

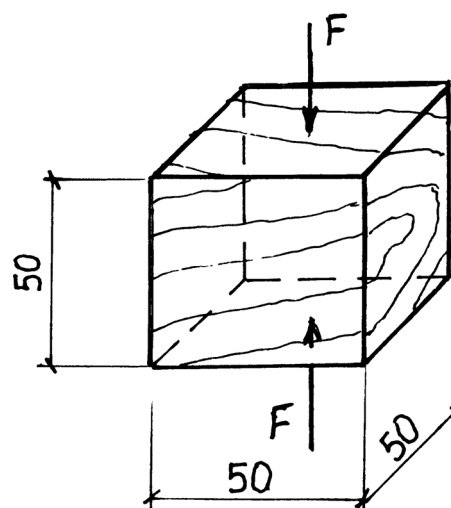


Рисунок 2.9

Різниця в міцності пояснюється тим, що деревина фактично складається з пластинок різної міцності. Ці пластинки утворюються з весняних та осінніх шарів деревини різної щільності.

При стиску вздовж волокон руйнування відбувається після вичерпання міцності твердих пластинок при порівняно невеликих деформаціях. Як свідчить діаграма стиску (рис. 2.10), між навантаженнями та деформацією спостерігається пропорційність майже до руйнування.

Випробування проводять до руйнування зразка. Максимальне зусилля визначають з діаграми стиску або відраховують на шкалі силовимірювача випробувальної машини.

При випробуванні на стиск поперек волокон (рис. 2.9) початок руйнування зразка помітити важко, оскільки при цьому стрілка манометра затримується на дуже короткий час. Далі деревина ущільнюється, її опір збільшується, навантаження зростає (рис. 2.11). Тому за максимальне навантаження приймають або силу F_{nu} , що відповідає межі пропорційності,

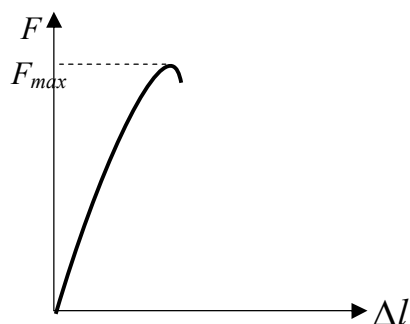


Рисунок 2.10

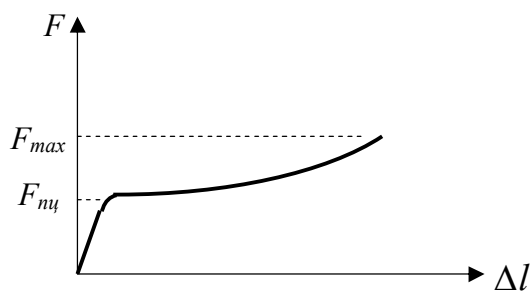


Рисунок 2.11

або близьку до неї F_{max} . Остання відповідає навантаженню в час припинення експерименту, коли висота зразка при стиску зменшується приблизно на 1/3 від свого початкового значення. При стиску поперек волокон руйнуються м'які шари зразка.

У результаті випробувань визначається межа міцності деревини (сосна) при стиску її вздовж та поперек волокон за формулою

$$\sigma_{max} = \frac{F_{max}}{A_0}.$$

Межа міцності деревини при стиску вздовж волокон приблизно в 10 разів більше межі міцності поперек волокон.

Міцність деревини залежить від її вологості. З підвищенням вологості опір деревини зменшується.

Послідовність виконання роботи

Після вимірювання зразок розташовують між стискуючими площинами випробувальної машини.

Проводять стиск зразка зростаючим навантаженням, одночасно спостерігають за станом зразка.

Після руйнування зразка фіксують максимальне значення навантаження F_{max} , вивільняють зразок.

У журналі спостережень виконують обчислення меж міцності деревини при стиску її вздовж та поперек волокон.

Контрольні запитання

1. Яка мета лабораторної роботи?
2. Які види випробувань проводять при стиску деревини?
3. Як впливає вологість деревини на опір її стиску?
4. Коли переривають випробування деревини на стиск уздовж і поперек волокон?
5. За якою формулою обчислюють межу міцності деревини при стиску?
6. Як відрізняються одна від одної діаграми стиску вздовж і поперек волокон?
7. Яка з меж міцності деревини при стиску більше (вздовж чи поперек волокон)?

2.5 Випробування деревини на скіл

Мета роботи: вивчення межі міцності деревини на скіл уздовж волокон.

Машина та прилади для випробувань

Випробування виконують на випробувальній машині УВМ-50 або ін. (п. 1.1, 1.2).

Зразок для випробувань

Для випробувань на скіл застосовують зразок, наведений на рисунку 2.12. Площина сколу зразка повинна бути дотична до річних кілець деревини. Зразок закладають у спеціальний пристрій (рис. 2.13) так, щоб виступ зразка був розташований напроти леза.

Основні відомості з теорії

При певній величині тиску F_{max} опори випробувальної машини на лезо (3) (рис. 2.13), закріплене гвинтом (2), станеться скіл виступу (1) зразка по площині $abcd$ (рис. 2.12). Межа міцності на скіл визначається за формулою

$$\sigma_c = \frac{F_{max}}{A_0},$$

де A_0 - площа сколу зразка (площа $abcd$).

Послідовність виконання роботи

Вимірявши розміри зразка, визначають площу сколу

$$A_0 = h_0 \cdot b_0.$$

Пристрій зі зразком встановлюють між стискуючими площинами випробувальної машини.

Поступово збільшуючи тиск, відзначають момент падіння значення навантаження. Найбільше досягнуте до цього падіння навантаження F_{max} відповідає миті сколу зразка. За наведеною вище формулою визначають межу міцності σ_c деревини на скіл.

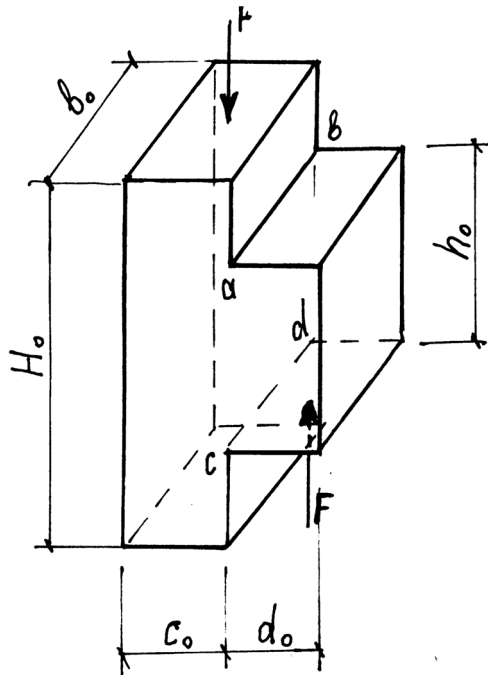


Рисунок 2.12

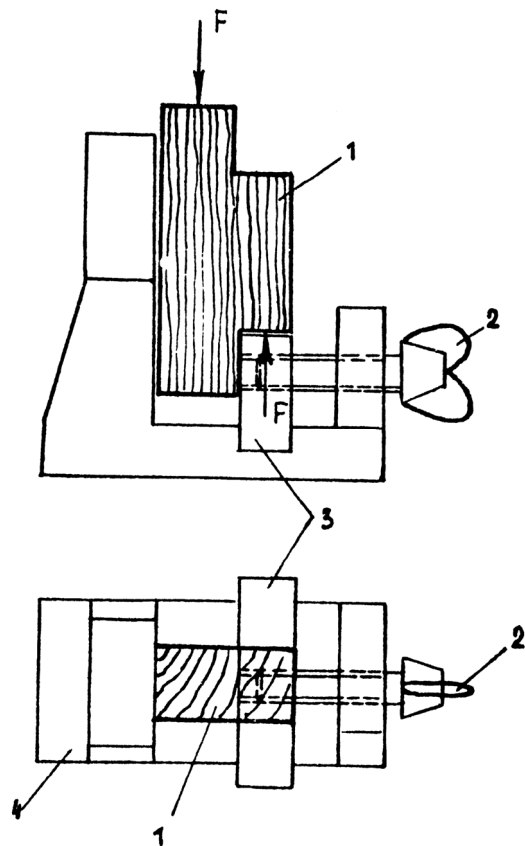


Рисунок 2.13

Контрольні запитання

1. Яка мета лабораторної роботи?
2. Як розташована площина сколу відносно річних кілець деревини?
3. Як визначають площу сколу зразка?
4. Як фіксується явище сколу деревини?
5. Як визначають межу міцності деревини на скіл?

2.6 Визначення коефіцієнта поперечної деформації сталі

Мета роботи: визначити коефіцієнт поперечної деформації – коефіцієнт Пуассона.

Випробувальна машина та прилади

Для проведення випробувань можна використати як гідравлічні, так і механічні машини для розтягу. Цю роботу виконують на машині ВМ-4Р (п. 1.2).

Для заміру деформацій використовують механічні тензометри (п. 1.5).

Зразок для випробувань

Для розтягу використовують плоский сталевий зразок прямокутного перерізу довільної ширини та товщини. Щоб виключити вплив напруженого стану в місцях затиску зразка на показання тензометрів, вважають, що його довжина повинна в чотири-п'ять разів перевищувати ширину.

Основні відомості з теорії

Велика кількість експериментів довели, що при одноосному розтягу (стиску) сталевого стержня останній змінює свої розміри як у поздовжньому, так і в поперечному напрямках. При одноосному розтягу поздовжні його розміри збільшуються, а поперечні зменшуються. Здатність матеріалу до деформування характеризується відносними деформаціями:

поздовжньою

$$\varepsilon = \frac{\Delta \ell}{\ell_0}$$

та поперечною

$$\varepsilon' = \frac{\Delta b}{b_0},$$

де $\Delta \ell = \ell_1 - \ell_0$ - абсолютна поздовжня деформація, що визначається як різниця між довжиною ℓ_1 стержня при дії навантаження та первісною довжиною ℓ_0 ;

$\Delta b = b_1 - b_0$ - абсолютна поперечна деформація, що визначається як різниця між шириною b_1 стержня при дії навантаження та первісною шириною.

Модуль частки, одержаної діленням відносної поздовжньої на відносну поперечну деформацію, називається коефіцієнтом поперечної деформації або коефіцієнтом Пуассона:

$$\nu = \left| \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} \right|.$$

Коефіцієнт Пуассона залежить виключно від пружних властивостей матеріалу і для кожного матеріалу постійний в межах лінійної пружності. Модуль пружності та коефіцієнт Пуассона цілком характеризують пружні властивості матеріалу. Для реальних матеріалів ν може приймати значення від 0 до 0,5. Так, для пробки $\nu = 0$, для каучуку та парафіну $\nu \approx 0,5$. Для більшості матеріалів ν знаходиться в межах 0,25...0,3 і не залежить від знака навантаження, тобто є однаковим при розтягу й стиску. Для дюралю $\nu = 0,31...0,36$.

Послідовність виконання роботи

Зразок закріплюють в зачіпки машини з перевіркою його центрування. При застосуванні важільних тензометрів їх ставлять після закріплення зразка в машині. Схема розташування тензометрів показана на рисунку 2.14. Тут позначено: (1) – тензометр, розташований вздовж напрямку дії навантаження (на поздовжній осі зразка), (2) – поперек дії навантаження.

Навантаження прикладають частками $\Delta F = 5$ кН. При кожному ступені навантаження беруть відліки на тензометрах. Випробування продовжують до навантаження $F_{max} = 30$ кН. Така методика експерименту дає можливість зменшити вплив імовірних похибок і підтвердити існування лінійної залежності між поздовжніми та поперечними деформаціями в межах пружної роботи матеріалу.

Позначимо $\Delta \ell_1$ та $\Delta \ell_2$ - абсолютне подовження та звуження зразка в межах баз тензометрів (1) та (2), що відповідають одному ступеню навантаження ΔF .

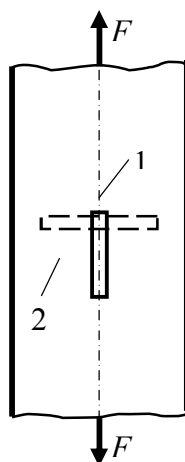


Рисунок 2.14

Тоді коефіцієнт Пуассона обчислюється так:

$$\nu = -\frac{\varepsilon'}{\varepsilon} = -\frac{\Delta l_2}{\Delta l_1}.$$

Якщо для виміру подовжень використовуються тензometri з однаковою базою, значення коефіцієнту Пуассона можна одержати за відношенням відліків тензометрів:

$$\nu = \frac{n_2}{n_1}.$$

Контрольні запитання

1. Що таке коефіцієнт Пуассона?
2. Які з деформацій, поздовжні чи поперечні, при розтягу більше за модулем?
3. Які зразки використовують для випробувань?
4. Назвіть межі, в яких повинен знаходитись коефіцієнт Пуассона в усіх випадках.
5. Які з наведених нижче величин не можуть бути значеннями коефіцієнта Пуассона для сталі: 0,5; 0,28; 0,15?

2.7 Визначення нормальних напружень уздовж висоти перерізу при згині балки прямокутного перерізу

Мета роботи: експериментальна перевірка лінійного закону розподілу нормальних напружень уздовж висоти перерізу сталеві балки та порівняння результатів експерименту з теоретичними значеннями.

Випробувальна машина та прилади

Роботу виконують на випробувальній машині УВМ-50 (п. 1.1). Для вимірювання деформацій використовують важельні тензometri (п. 1.5).

Зразок для випробувань

Для роботи потрібна сталева балка прямокутного перерізу висотою 10 см, шириною 3 см. Довжина балки становить 110 см. Модуль пружності сталі $E = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$.

Схема завантаження балки та розташування тензометрів наведена на рисунку 2.15.

Балку встановлюють на шарнірні опори A та B випробувальної машини, відстань між якими $L=100$ см. Для забезпечення симетричного завантаження застосовують допоміжну балку CD , що передає навантаження на балку AB

через опори C та D , розташовані на відстані $a=30$ см. Для визначення напружень (деформацій) в зоні чистого згину (ділянка CD) встановлюють уздовж висоти 5 тензометрів. Координати розміщення тензометрів: $y_1=4,0$ см; $y_2=2,0$ см; $y_3=0$ (нейтральна вісь); $y_4=-2,0$ см; $y_5=-4,0$ см.

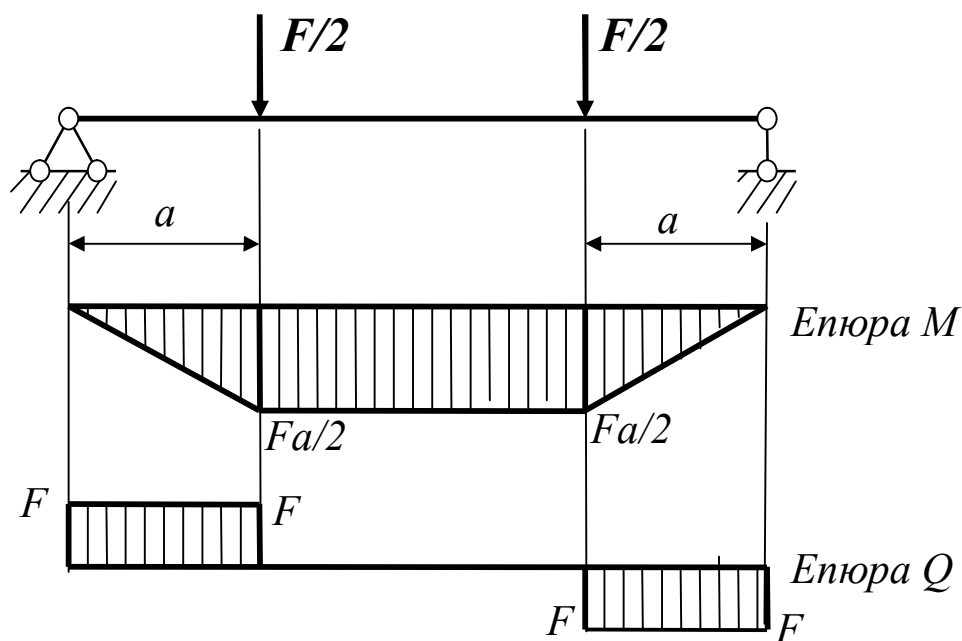
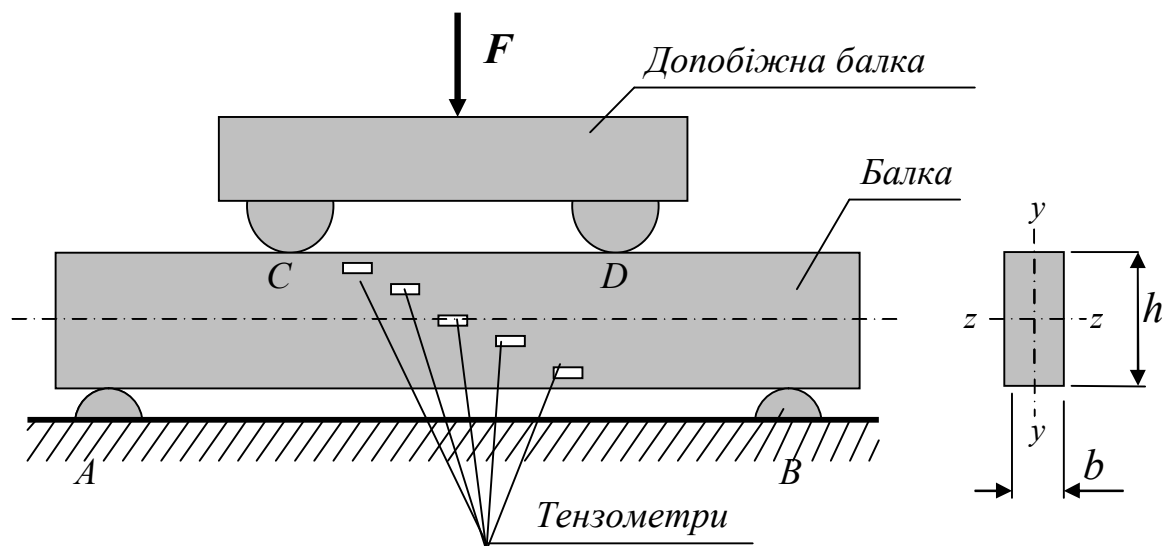


Рисунок 2.15

Основні відомості з теорії

З курсу опору матеріалів відомо, що при визначенні нормальних напружень при згині приймають гіпотезу плоских перерізів (гіпотезу Бернуллі).

При плоскому згині в межах пружної роботи матеріалу балки напруження у точках поперечного перерізу визначають за формулою Нав'є:

$$\sigma = \frac{M \cdot y}{I_z}, \quad (a)$$

де M - згинаючий момент у перерізі балки;

y - відстань від нейтральної осі до тієї точки перерізу, в якій визначають напруження;

I_z - момент інерції перерізу відносно нейтральної осі.

Найбільші нормальні напруження виникають у найбільш віддалених від нейтральної осі точках перерізу:

$$\sigma_{max} = \frac{M \cdot y_{max}}{I_z} = \frac{M}{W_z}, \quad (б)$$

де W_z - момент опору перерізу відносно нейтральної осі.

Для перевірки гіпотези плоских перерізів достатньо перевірити дійсність формули (а) для кількох точок перерізу, тобто порівняти напруження, знайдені експериментальним шляхом та за означеною формулою.

При чистому згині поперечна сила в перерізах відсутня, отже зсув відсутній і дотичні напруження $\tau = 0$. Нормальні напруження будуть однакові для волокна балки, що знаходиться на одній відстані від нейтральної осі в усій зоні чистого згину. Це дозволяє розташувати тензометри для виміру деформацій у різних перерізах зони чистого згину, а визначені напруження віднести до одного перерізу.

Для визначення нормальних напружень за результатами випробувань використовують закон Гука:

$$\sigma = \varepsilon \cdot E, \quad (в)$$

де ε - відносна лінійна деформація за вимірами тензометра;

E - модуль пружності матеріалу балки.

Послідовність виконання роботи

При початку випробувань необхідно вибрати вільний рух в тензометрах, тому перший відлік знімають на всіх п'яти тензометрах при навантаженні 5 кН (500 кГс). Далі навантаження збільшують ступенями по 5 кН до 30 кН (3000 кГс). На кожному ступені навантаження відліки тензометрів записують в журнал лабораторних робіт.

Найбільше навантаження при випробуванні (30 кН) обирають так, щоб напруження не перевищували межі пропорційності матеріалу балки.

У журналі лабораторних робіт обчислюють теоретичні (а) та експериментальні (в) значення напружень в усіх п'яти точках. Порівнюючи ці

значення, обчислюють різницю у відсотках. Для наочності за одержаними даними будують епюри нормальних напружень уздовж висоти перерізу, накладаючи експериментальну й теоретичну епюри одна на іншу. Відхилення експериментальних значень напружень від теоретичних обумовлені похибками випробувань та прийнятим умовним модулем пружності, який може відрізнятися від дійсного.

Контрольні запитання

1. Яка мета лабораторної роботи?
2. Як залежить величина нормальних напружень від розташування точки вздовж висоти перерізу?
3. Якими приладами вимірюють деформації?
4. Яку пружну характеристику матеріалу необхідно знати для обчислення напружень за деформаціями?

2.8 Випробування сталевого циліндричного зразка на кручення

Мета роботи: вивчення поведінки матеріалу при крученні; визначення межі пропорційності $\tau_{пц}$, межі міцності τ_{max} та модуля пружності G при зсуві.

Випробувальна машина та прилади

Випробування зразка на кручення виконують на машині АМ-1 (п. 1.3).

Для вимірювання кутів закручення зразка використовується пристрій з індикатором годинникового типу (п. 1.6).

Зразок для випробувань

У роботі використовують стандартний циліндричний зразок ($d=0,8$ см, $\ell=10$ см – розрахункова довжина). Модуль пружності першого роду матеріалу зразка E , коефіцієнт поперечної деформації (Пуассона) μ відомі. Зразок і схема діючих на нього сил наведені на рисунку 2.16.

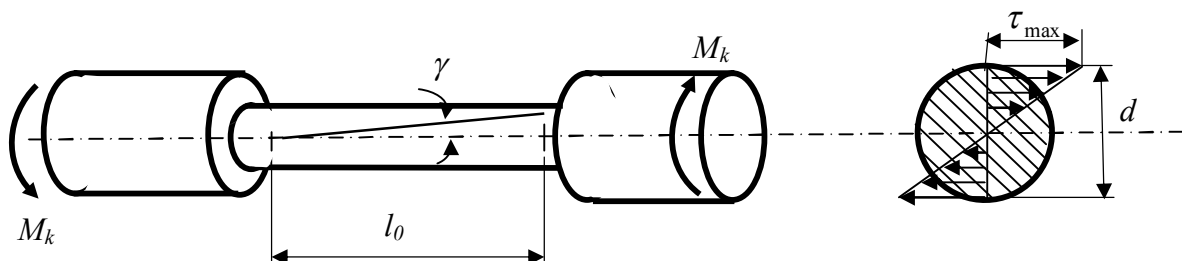


Рисунок 2.16

Основні відомості з теорії

При крученні зразка в точках його перерізу виникають дотичні напруження

$$\tau = \frac{M_k \cdot \rho}{I_\rho},$$

де M_k - крутний момент у перерізі,

ρ - відстань від центра кручення перерізу (центра круглого перерізу) до точки, в якій визначають напруження,

$$I_\rho = \frac{\pi d^4}{32} - \text{полярний момент інерції круглого перерізу.}$$

Найбільшого значення дотичні напруження досягають у точках перерізу на поверхні зразка при $\rho = \rho_{max} = r$:

$$\tau_{max} = \frac{M_k \cdot r}{I_\rho} = \frac{M_k}{W_\rho},$$

$$\text{де } W_\rho = \frac{I_\rho}{r} = \frac{\pi d^3}{16} - \text{момент опору крученню круглого перерізу.}$$

Модуль пружності при зсуві можна знайти з формули для кута закручення зразка

$$\theta = \frac{M_{кн} \cdot \ell}{G I_\rho},$$

де $M_{кн}$ - крутний момент, що відповідає межі пропорційності, на розрахунковій довжині ℓ зразка,

θ - кут закручення зразка на довжині ℓ ,

G - модуль пружності матеріалу при зсуві.

Отже

$$G = \frac{M_{кн} \ell}{\theta I_\rho}.$$

Наведені формули для θ та G дійсні для крутних моментів $M_k \leq M_{кн}$, тобто коли матеріал зразка працює в пружній стадії.

Послідовність виконання роботи

Перед випробуваннями вимірюють діаметр d зразка та розрахункову довжину. Зразок разом з пристроєм для вимірювання кута повороту (рис. 2.17) закріплюється у зачіпках машини.

Заносять в журнал лабораторної роботи вихідні дані d , ℓ , E , μ .

Навантаження – крутний момент – прикладають однаковими частками ΔM_k . Після кожного ступеня навантаження знімають відліки на індикаторі.

Згідно із законом Гука кути закручення $\Delta\theta$, що відповідають однаковим приростам крутного моменту ΔM_k , будуть однакові. Граничне значення моменту, до якого дійсний закон Гука дає момент $M_{k_{нц}}$, що відповідає межі пропорційності. Отже

$$\tau_{нц} = \frac{M_{k_{нц}}}{W_\rho}.$$

Після досягнення $M_{k_{нц}}$ індикатор знімають і продовжують збільшувати навантаження. Межу міцності при зсуві знаходять за значенням моменту $M_{k_{max}}$, що відповідає руйнуванню зразка:

$$\tau_{max} = \frac{M_{k_{max}}}{W_\rho}.$$

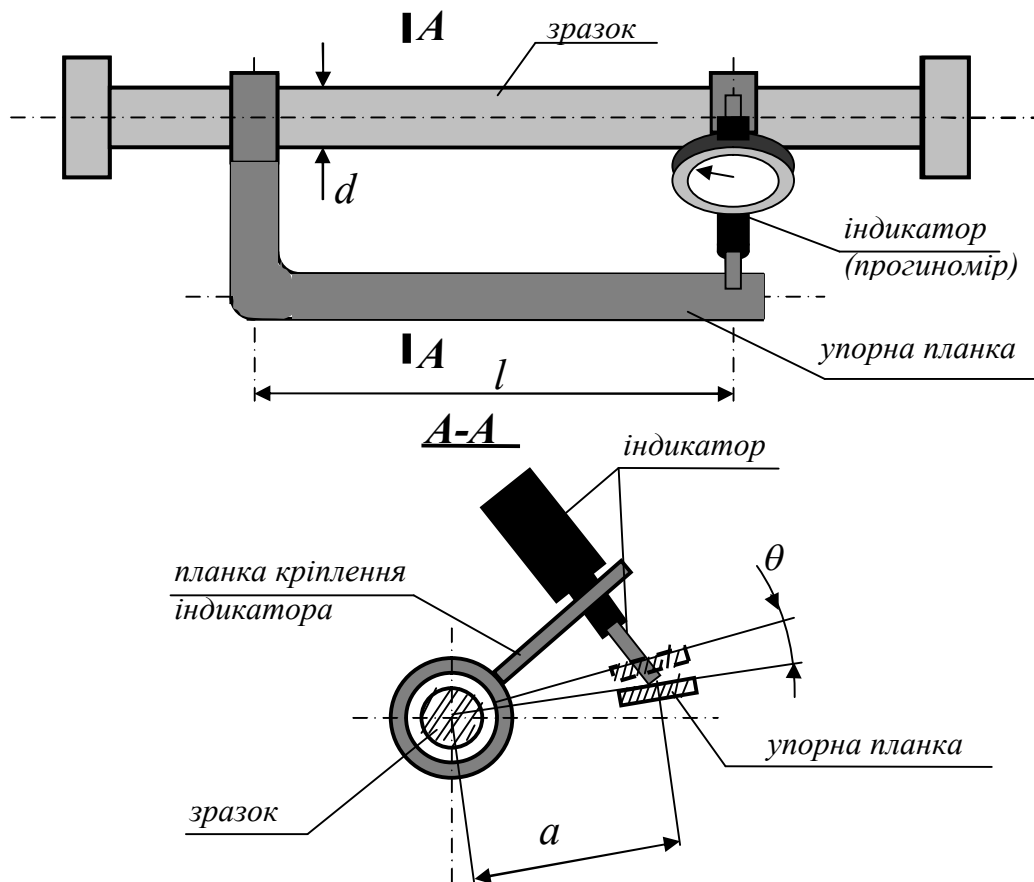


Рисунок 2.17

Для визначення модуля пружності при зсуві обчислюють середній приріст показників індикатора у межах пружної роботи матеріалу зразка

$$\Delta_{\text{ср}} = \frac{\Sigma(\Delta\theta)}{n},$$

де n - число ступенів навантаження до межі пропорційності.

За одержаними значеннями знаходять середній приріст кута закручення:

$$\Delta\theta = \frac{\Delta_{\text{ср}}}{a K}$$

та модуль пружності при зсуві

$$G = \frac{\Delta M_{\kappa} \cdot \ell}{\Delta\theta \cdot I_{\rho}}.$$

Контрольні запитання

1. Яка мета лабораторної роботи?
2. Як визначають теоретичні дотичні напруження та кути закручення?
3. Де діють найбільші дотичні напруження в перерізі циліндричного стержня при його крученні?
4. Як працює машина АМ-1?
5. Який принцип роботи прогиноміра (індикатора)?
6. Чи пов'язані між собою значення модулів пружності E та G ?

2.9 Випробування сталі на стомленість при змінних за знаком напруженнях

Мета роботи: ознайомлення з методом визначення межі витривалості (стомленості) для сталі.

Випробувальна машина та прилади

Випробування матеріалів на витривалість проводять на спеціальних машинах, які дозволяють навантажувати зразки змінними навантаженнями з частотою цикла 2000... 3000 за хвилину. Одна з таких машин наведена в п 1.4.

Зразок для випробувань

Для визначення межі витривалості сталі використовують циліндричний зразок, наведений на рисунку 2.18.

На практиці для одержання вірогідних результатів випробування виконують для 6... 10 однакових зразків.

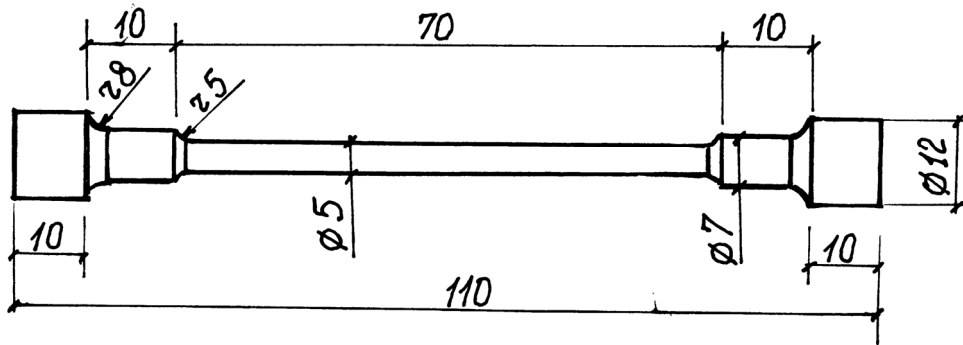


Рисунок 2.18

Основні відомості з теорії

Відомо, що деталі машин та споруд, які протягом значного часу зазнають змінного за знаком навантаження, руйнуються без помітних залишкових деформацій при напруженнях значно менших, ніж межа міцності матеріалу. Це явище називають стомленістю матеріалів.

Як показали експерименти, межа міцності, інші механічні характеристики та структура матеріалу при змінних напруженнях не змінюються. Багатьма експериментами встановлено, що при дії протягом певного часу змінного за знаком напруження певної величини в перерізі елемента з'являється тріщина. Появу цієї тріщини слід чекати або в місцях найбільших напружень, або в місцях, де є дефекти матеріалу. В подальшому при дії змінних напружень ця тріщина зростає і розповсюджується на все більшу частину перерізу. Пластичні деформації зосереджуються в місці тріщини, тому помітних залишкових деформацій на час руйнування не виявляється. Матеріал у тріщині стає гладким. Після того, як частина перерізу, ще не охоплена тріщиною, не може опиратися дії зовнішніх сил, елемент раптово руйнується. У перерізі руйнування виявляються дві зони: зовнішня – відшліфована і внутрішня – з крихким зломом.

За результатами статичних випробувань та випробуваннях на удар неможливо виявити здатність матеріалу опиратися тривалим змінним за знаком навантаженням. Для цього застосовують окремі випробування на стомленість, під час яких визначають межу витривалості (стомленості) матеріалу. Такою межею називають найбільше за абсолютним значенням напруження σ_t , яке не викликає руйнування стомленості при необмеженій кількості циклів навантаження.

Послідовність виконання роботи

Перший зразок встановлюють в машині й забезпечують навантаження $2F$ (рис. 2.19) так, щоб напруження у розрахункових перерізах зразка (в зоні чистого згину CD) дорівнювало $0,5 \sigma_{max}$.

Значення сили F при цьому таке:

$$F = \frac{0,5\sigma_{max} \cdot W}{a},$$

де σ_{max} - межа міцності матеріалу,

W - момент опору перерізу зразка,

a - відстань від опор A та B до точок прикладання навантаження: відповідно точок C та D .

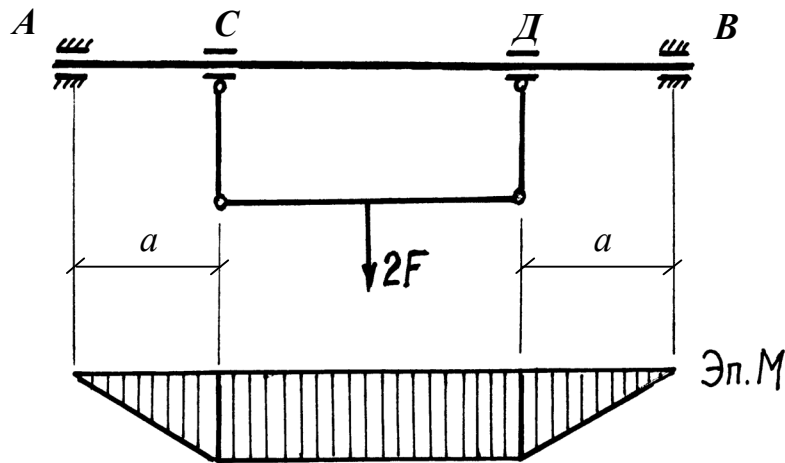


Рисунок 2.19

При обертанні зразка кожна точка його перерізу змінює положення відносно площини навантаження, отже величина напруження в ній змінюється. Характер зміни напруження, що починає рух з нижнього положення, ілюструється графіком на рисунку 2.20. Такий цикл зміни напруження називається симетричним.

Вмикають машину, яка працює до руйнування зразка. Кількість циклів, які витримав зразок, фіксується лічильником.

Далі випробування виконують на другому зразку при зменшеному навантаженні. Зрозуміло, що при меншому навантаженні кількість циклів до руйнування збільшиться.

Випробування продовжують на інших зразках, поступово зменшуючи навантаження, і закінчують тоді, коли зразок буде витримувати до руйнування кількість циклів порядку 10^7 .

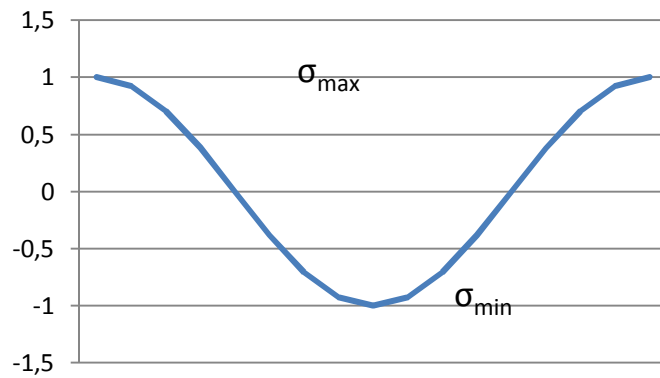


Рисунок 2.20

Вважається, якщо матеріал не зруйнувався при такій кількості циклів, то він може витримати нескінченно велику кількість циклів. Отже відповідне напруження можна вважати межею витривалості (стомленості) σ_{-t} матеріалу.

Результати випробувань подають у вигляді діаграми (рис. 2.21), на якій вздовж ординати відкладають напруження, а вздовж абсциси – відповідну кількість витриманих циклів.

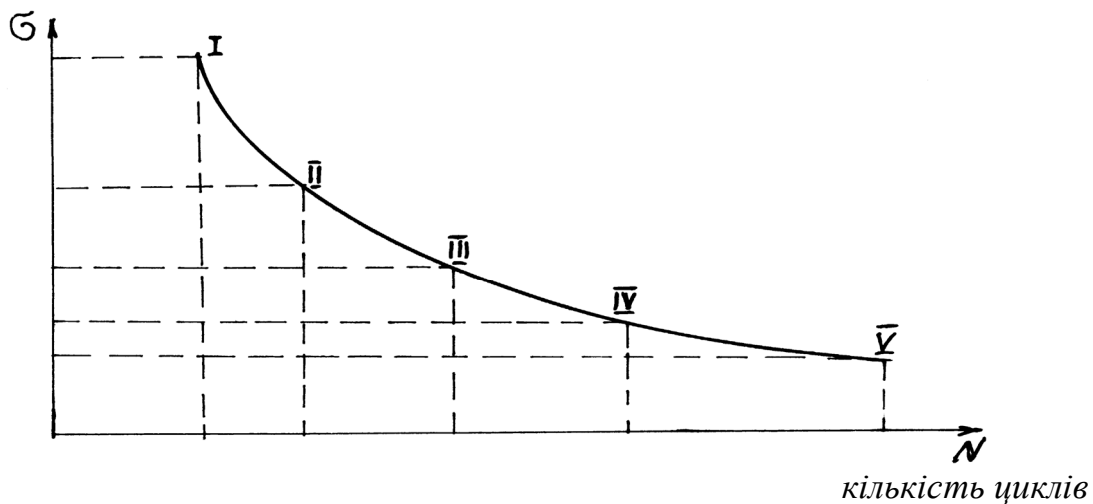


Рисунок 2.21

Крива на цій діаграмі називається кривою Велера.

Випробування на опір з визначенням межі витривалості зазвичай потребує багато часу і може триватися кілька діб.

У цій роботі використовується прискорений метод визначення межі витривалості. Згідно з ним межа витривалості визначається за даними двох випробувань на основі такої залежності:

$$\sigma_{-1} = ((N_1^2 \sigma_1^2 - N_2^2 \sigma_2^2) / (N_1^2 - N_2^2))^{1/2},$$

де N_1 - кількість циклів, що витримав до руйнування зразок при напруженні σ_1 ;

N_2 - кількість циклів, що витримав до руйнування зразок при напруженні σ_2 ;

Отже за цією методикою достатньо випробувати лише два зразка при двох різних навантаженнях

Контрольні запитання

1. Яка мета лабораторної роботи?
2. Як влаштована машина для випробувань на витривалість?
3. Який зразок використовують для випробувань?
4. Що називається межею витривалості (стомленості) матеріала?
5. Як визначити напруження від прикладеного на машині навантаження?
6. В якій послідовності виконують випробування?
7. Що таке крива Велера? Як за цією кривою визначити межу витривалості матеріалу?

2.10 Визначення питомої ударної в'язкості сталі

Мета роботи: визначення питомої ударної в'язкості сталі.

Випробувальна машина та прилади

Випробування на ударну в'язкість виконують на маятниковому копрі (п. 1.5).

Зразок для випробувань

Для випробувань використовують зразки типів I... V (рис. 2.22). Їх виконують з надрізами, щоб фіксувати місце перелому при випробуванні. Зразки I... III відрізняються глибиною прорізи, зразок IV має іншу форму прорізи, а зразок V зменшену ширину перерізу.

Зразки вирізають на металорізальних верстатах при умовах, що виключають наклеп та нагрів, щоб не змінити властивостей металу. Остаточну обробку виконують на металошліфувальних верстатах. Надріз здійснюють фрезеруванням або абразивним каменем.

Основні відомості з теорії

Ударна в'язкість – це складна комплексна характеристика, яка залежить від низки більш простих механічних властивостей. Останні визначають при статичних випробуваннях, тобто під дією дуже повільно зростаючих навантажень, отже вони не можуть характеризувати здатність матеріалу протистояти ударному навантаженню. Випробування на ударну в'язкість належать до динамічних видів випробувань, які застосовують для того, щоб оцінити здатність матеріалів протистояти ударним навантаженням та виявити їх схильність до крихкого руйнування.

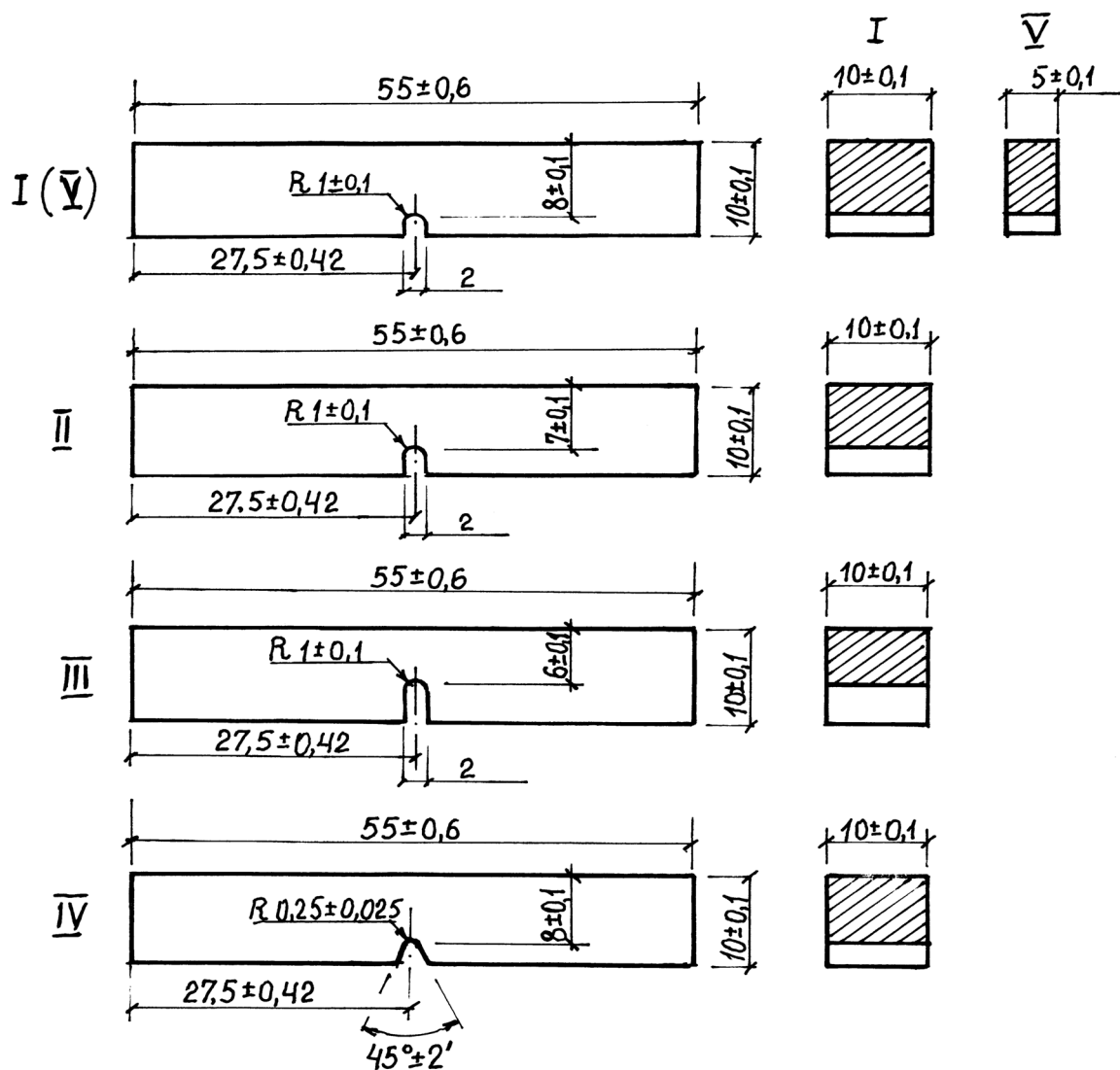


Рисунок 2.22

Ударна в'язкість характеризується питомою роботою, витраченою на руйнування зразка:

$$d = \frac{W}{A},$$

де W - робота, витрачена на руйнування зразка,

A - площа перерізу зразка у місці надрізу.

Послідовність виконання роботи

Перед початком випробувань заміряють зразок і записують величини b – ширину та h – висоту перерізу в місці надрізу.

Зразок кладуть горизонтально в спеціальний шаблон, який забезпечує розташування надрізу точно посередині прольоту (рис. 2.23).

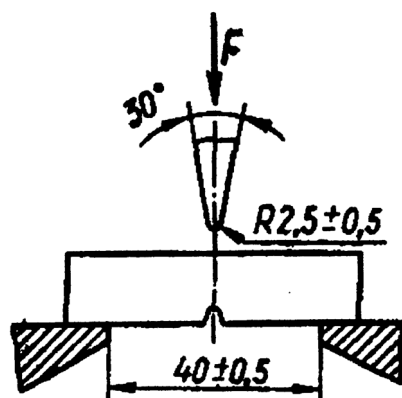


Рисунок 2.23.

Удар виконують з боку, протилежного надрізу, в площині, перпендикулярній до поздовжньої осі зразка. На шкалі копра знімають відлік, який дає величину роботи W , витрачену на руйнування зразка.

Обчисливши площу перерізу зразка $A = b \cdot h$, визначають питому роботу руйнування зразка – питому ударну в'язкість.

Додаток А Журнали лабораторних робіт

«_____» _____р.

Лабораторна робота № 1

Випробування сталевих нормального зразка на розтяг

Мета роботи _____

Випробування виконуються на машині _____

Схема випробувальної машини

Вихідні дані

1. Рисунок зразка та схема сил, що діють на нього при випробуванні

2. Характеристики зразка до випробування:

діаметр

$d_0 =$ _____ см

розрахункова довжина

$l_0 =$ _____ см

площа поперечного перерізу

$A_0 =$ _____ см²

об'єм розрахункової частини

$V_0 =$ _____ см³

Результати випробування

1. Рисунок зразка після випробування

Продовження додатка А

2. Характеристики зразка після випробування:
- | | |
|--|---|
| діаметр шийки | $d_w = \underline{\hspace{2cm}} \text{ см}$ |
| діаметр зразка | $d_1 = \underline{\hspace{2cm}} \text{ см}$ |
| довжина розрахункової частини | $l_1 = \underline{\hspace{2cm}} \text{ см}$ |
| площа перерізу в місці розриву (шийки) | $A_1 = \underline{\hspace{2cm}} \text{ см}^2$ |
3. Виміряні навантаження, що відповідають:
- | | |
|--------------------|--|
| межі текучості | $F_m = \underline{\hspace{2cm}} \text{ кг}$ |
| межі міцності | $F_{\max} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ кг}$ |
| моменту руйнування | $F_p = \underline{\hspace{2cm}} \text{ кг}$ |
4. Величини, що характеризують пластичність матеріалу:
- | | |
|--------------------------------|--|
| абсолютне залишкове подовження | $\Delta l = \underline{\hspace{2cm}} \text{ см}$ |
| відносне залишкове подовження | $\varepsilon = \underline{\hspace{2cm}} \%$ |
| відносне залишкове звуження | $\psi = \underline{\hspace{2cm}} \%$ |
5. Величини, які характеризують міцність матеріалу:
- | | |
|-------------------------------|--|
| межа текучості | $\sigma_m = \underline{\hspace{2cm}} \text{ кг/см}^2$ |
| межа міцності | $\sigma_{\max} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ кг/см}^2$ |
| дійсне напруження при розриві | $\sigma_p = \underline{\hspace{2cm}} \text{ кг/см}^2$ |
6. Інші механічні характеристики:
- | | |
|-----------------------------------|--|
| масштаб сил (ординат) | $m = \underline{\hspace{2cm}} \text{ кг/см}$ |
| масштаб подовжень (абсцис) | $n = \underline{\hspace{2cm}} \text{ см/см}$ |
| площа діаграми розтягу | $S = \underline{\hspace{2cm}} \text{ см}^2$ |
| повна робота, витрачена на розрив | $W = \underline{\hspace{2cm}} \text{ кгсм}$ |
| питома робота деформації | $w = \underline{\hspace{2cm}} \text{ кгсм/см}^3$ |
| коефіцієнт заповнення діаграми | $\eta = \underline{\hspace{2cm}}$ |

Діаграма розтягу та діаграма напружень матеріалу

Випробувана сталь належить до марки _____

Роботу прийняв «_____» р. Керівник _____

Лабораторна робота № 2

Випробування сталі на стиск з визначенням межі міцності

Мета роботи _____

Випробування виконуються на машині _____

Вихідні дані

1. Рисунок зразка та схема сил, що діють на нього при випробуванні

2. Характеристики зразка до випробування:

діаметр зразка

$d_0 =$ _____ см

початкова висота

$h_0 =$ _____ см

площа перерізу

$A_0 =$ _____ см²

Результати випробування

1. Рисунок зразка після випробування

Продовження додатка А

2. Характеристика зразка після випробування:

найбільший діаметр

$D =$ _____ см

висота

$h =$ _____ см

площа перерізу

$A =$ _____ см

3. Визначені навантаження:

сила, що відповідає межі пропорційності $F_{ny} =$ _____ кг

найбільше навантаження $F_{max} =$ _____ кг

4. Величини, що характеризують властивості матеріалу:

межа пропорційності $\sigma_{ny} =$ _____ кг/см²

напруження в найбільшому перерізі $\sigma_{max} =$ _____ кг/см²

відносне скорочення зразка $\varepsilon =$ _____ %

відносне розширення поперечного перерізу $\psi =$ _____ %

Роботу прийняв «_____» _____ р.

Керівник _____

Лабораторна робота № 3

Випробування чавуна на стиск з визначенням межі міцності

Мета роботи _____

Випробування виконуються на машині _____

Вихідні дані

3. Рисунок зразка та схема сил, що діють на нього при випробуванні

4. Характеристики зразка:

діаметр

$d_0 =$ _____ см

площа перерізу

$A_0 =$ _____ см²

Результати випробувань

1. Рисунок зразка після випробувань

2. Максимальне навантаження

$F_{vax} =$ _____ кг

3. Межа міцності чавуна

$\sigma_{vax} =$ _____ кг/см²

4. Діаграма розтягу чавуна

Роботу прийняв «____» _____р.

Керівник _____

Лабораторна робота № 4

Випробування деревини на стиск уздовж і поперек волокон

Мета роботи _____

Випробування виконуються на машині _____

Порода деревини _____

Вихідні дані

1. Рисунок зразків та сили, що діють на них при випробуванні
- | Уздовж волокон | Поперек волокон |
|----------------|-----------------|
|----------------|-----------------|

2. Площа перерізу зразків

Уздовж волокон

Поперек волокон

$$A_0 = a_0 \cdot b_0 = \text{_____} \text{ см}^2 \quad A_0 = a_0 \cdot b_0 = \text{_____} \text{ см}^2$$

Результати випробування

1. Максимальне навантаження при руйнуванні

Уздовж волокон

Поперек волокон

$$F_{vax} = \text{_____} \text{ кг/см}^2 \quad F_{vax} = \text{_____} \text{ кг/см}^2$$

2. Межа міцності деревини

Уздовж волокон

Поперек волокон

$$\sigma_{vax} = \text{_____} \text{ кг/см}^2 \quad \sigma_{vax} = \text{_____} \text{ кг/см}^2$$

3. Діаграми стиску

Уздовж волокон

Поперек волокон

Роботу прийняв «____» _____р. Керівник _____

Лабораторна робота № 5
Випробування деревини на скіл уздовж волокон

Мета роботи _____

Випробування виконуються на машині _____

Порода деревини _____

Вихідні дані

Рисунок зразків та схеми сил, що діють на них при випробуванні

Схема устаткування для випробування та установки зразка

Площа перерізу зразків $A_0 = a_0 \cdot b_0 =$ _____ $см^2$

Результати випробування

Зразок

Максимальне навантаження при руйнуванні

1 $F_{1max} =$ _____ $кг/см^2$

2 $F_{2max} =$ _____ $кг/см^2$

3 $F_{3max} =$ _____ $кг/см^2$

Усереднене навантаження при руйнуванні

$F_{max} =$ _____ $кг/см^2$

Роботу прийняв «____» _____р.

Керівник _____

Лабораторна робота № 6

Визначення коефіцієнта поперечної деформації

Мета роботи _____

Випробування виконуються на машині _____

Вихідні дані

1. Схема зразка з розташуванням тензометрів

2. Геометричні дані зразка та характеристика устаткування:

площа поперечного перерізу зразка: $A_0 = b_0 \times h_0 =$ _____ см^2

розрахункова довжина (база тензометрів) $l =$ _____ мм

ціна поділки поздовжнього тензометра $K_{\text{позд.}} =$ _____ мк

ціна поділки поперечного тензометра $K_{\text{поп.}} =$ _____ мк

3. Журнал випробувань

№ з/п	Наван- таження F , кН	Приріст навантаж. ΔF , кН	Відліки за тензометрами, мк				Приміт- ки
			Поздовж.	Приріст	Поперечн.	Приріст	
			A_1	ΔA_1	A_2	ΔA_2	
1	2	3	4				
1							
2							
3							

4							
5							
6							
7							
8							
Середній приріст відліків тензом.			$C(\Delta A_1) =$		$C(\Delta A_2) =$		

4.Результати випробувань:

приріст абсолютної деформації за поздовжнім тензометром:

$$\Delta l_{\text{позд.}} = \frac{C(\Delta A_1) \cdot K_{\text{позд.}}}{1000} = \text{_____} \text{ мм}$$

приріст абсолютної деформації за поперечним тензометром:

$$\Delta l_{\text{поп.}} = \frac{C(\Delta A_2) \cdot K_{\text{поп.}}}{1000} = \text{_____} \text{ мм}$$

середня відносна поздовжня деформація:

$$\varepsilon_+ = \frac{\Delta l_{\text{позд.}}}{l} = \text{_____}$$

середня відносна поперечна деформація:

$$\varepsilon_- = \frac{\Delta l_{\text{поп.}}}{l} = \text{_____}$$

коефіцієнт поперечної деформації:

$$\mu = \frac{\varepsilon_-}{\varepsilon_+} = \text{_____} = \text{_____}$$

максимальне напруження при випробуванні:

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{F_{\text{max}}}{A_0} = \text{_____} = \text{_____} \text{ кН / см}^2$$

Роботу прийняв «_____» _____ р.

Керівник _____

Лабораторна робота № 7

**Визначення нормальних напружень уздовж висоти перерізу
при згині балки прямокутного перерізу**

Метароботи _____

Випробування виконується на машині _____

Вихідні дані

1. Схема навантаження балки
та епюри згинаючих моментів і поперечних сил

2. Схема розташування тензометрів

3. Геометричні характеристики балки та дані про розташування
тензометрів:
прогон балки $L = \text{_____} \text{ см}$

Продовження додатка А

висота перерізу балки
ширина перерізу балки

$h = \underline{\hspace{2cm}} \text{ см}$

$b = \underline{\hspace{2cm}} \text{ см}$

момент інерції перерізу

$I = \frac{bh^3}{12} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ см}^4$

база тензометрів

$l = \underline{\hspace{2cm}} \text{ см}$

ціна поділки тензометрів

№1 – $K_1 = \underline{\hspace{2cm}} \text{ мк}$
№2 – $K_2 = \underline{\hspace{2cm}} \text{ мк}$
№3 – $K_3 = \underline{\hspace{2cm}} \text{ мк}$
№4 – $K_4 = \underline{\hspace{2cm}} \text{ мк}$
№5 – $K_5 = \underline{\hspace{2cm}} \text{ мк}$

відстань від опори до точки прикладання сили

$a = \underline{\hspace{2cm}} \text{ см}$

відстань від нейтральної осі до тензометрів

$Z_1 = \underline{\hspace{2cm}} \text{ см}$
 $Z_2 = \underline{\hspace{2cm}} \text{ см}$
 $Z_3 = \underline{\hspace{2cm}} \text{ см}$
 $Z_4 = \underline{\hspace{2cm}} \text{ см}$
 $Z_5 = \underline{\hspace{2cm}} \text{ см}$

4. Журнал випробувань

	Навантаження $F, \text{кН}$	Відліки за тензометрами №									
		1		2		3		4		5	
		Відлік	Приріст $\Delta 1$	Відлік	Приріст $\Delta 2$	Відлік	Приріст $\Delta 3$	Відлік	Приріст $\Delta 4$	Відлік	Приріст $\Delta 5$
1											
2											
3											
4											
5											
Середній приріст відліка		$C(\Delta_1) =$		$C(\Delta_2) =$		$C(\Delta_3) =$		$C(\Delta_4) =$		$C(\Delta_5) =$	

5. Результати випробувань:

модуль пружності

$E = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

згинаючий момент, що відповідає одному приросту навантаження

Продовження додатка А

$$\Delta M = \frac{\Delta F \cdot a}{2} = \text{-----} = \text{-----} \text{ кНсм}$$

теоретичне значення напружень

$$\sigma_{i \text{ теор.}} = \frac{\Delta M \cdot Z_i}{I}$$

$$\left[\begin{array}{l} \sigma_1 = \text{-----} \text{ кН / см}^2 \\ \sigma_2 = \text{-----} \text{ кН / см}^2 \\ \sigma_3 = \text{-----} \text{ кН / см}^2 \\ \sigma_4 = \text{-----} \text{ кН / см}^2 \\ \sigma_5 = \text{-----} \text{ кН / см} \end{array} \right.$$

середній приріст відносних деформацій

$$\varepsilon_i = \frac{C(\Delta_i) \cdot Z_i}{l \cdot 10 \cdot 1000}$$

$$\left[\begin{array}{l} \varepsilon_1 = \text{-----} \\ \varepsilon_2 = \text{-----} \\ \varepsilon_3 = \text{-----} \\ \varepsilon_4 = \text{-----} \\ \varepsilon_5 = \text{-----} \end{array} \right.$$

експериментальне значення напружень

$$\sigma_i = E \cdot \varepsilon_i$$

$$\left[\begin{array}{l} \sigma_1 = \text{-----} \text{ кН / см}^2 \\ \sigma_2 = \text{-----} \text{ кН / см}^2 \\ \sigma_3 = \text{-----} \text{ кН / см}^2 \\ \sigma_4 = \text{-----} \text{ кН / см}^2 \\ \sigma_5 = \text{-----} \text{ кН / см}^2 \end{array} \right.$$

5. Епюра розподілу напружень за висотою балки

Роботу прийняв «____» _____ р.

Керівник _____

Лабораторна робота № 8

Випробування сталевого круглого зразка на кручення з визначенням межі пропорційності, межі міцності та модуля пружності при зсуві

Мета роботи _____

Випробування виконуються на машині _____

Вихідні дані

1. Схема зразка та розташування прогиноміра для вимірювання кута закручення

2. Геометричні характеристики зразка та дані про розташування прогиноміра:

діаметр перерізу зразка	$d =$ _____ см
полярний момент інерції	$I_{\rho} =$ _____ см ⁴
полярний момент опору	$W_{\rho} =$ _____ см ³
розрахункова довжина зразка	$l =$ _____ см
модуль пружності матеріалу зразка	$E =$ _____ МПа
коефіцієнт поперечної деформації	$\mu =$ _____
відстань від осі зразка до прогиноміра	$a =$ _____ см
коефіцієнт збільшення прогиноміра	$K =$ _____

Продовження додатка А

3. Журнал спостережень

$N_0 N_0$ з/п	Крутний момент, M , кг см	Відлік за прогиноміром	Приріст відліку Δ
1			
2			
3			
4			
5			
6			

Середній приріст відліків $\Delta_{cp} = \frac{\sum \Delta}{n} =$ _____

4. Результати випробувань:

момент, що відповідає межі пропорційності $M_{ny} =$ _____ кг см

межа пропорційності при крученні $\tau_{ny} = \frac{M_{ny}}{W} =$ _____ кг/см²

максимальний крутний момент $M_{max} =$ _____ кг см

середній приріст кута закручення $\Delta\theta = \frac{\Delta_{cp}}{aK} =$ _____ рад

модуль пружності при зсуві з експерименту $G_e = \frac{\Delta M l}{I_\rho \Delta\theta} =$ _____ кг/см²

модуль пружності теоретичний $G_m = \frac{E}{2(1+\mu)} =$ _____ кг/см²

порівняння величин модулів пружності $\frac{G_e - G_m}{G_e} \cdot 100 =$ _____ %

межа міцності при крученні $\tau_{max} = \frac{M_{max}}{W_\rho} =$ _____ кг/см²

Роботу прийняв «____» _____ р.

Керівник _____

Лабораторна робота № 9

**Випробування сталі на стомленість при змінних за знаком
напруженнях**

Мета роботи _____

Випробування виконуються на машині _____

Вихідні дані

1. Схема випробувальної машини та розташування зразка з епюрою згинаючих моментів у перерізах зразка

2. Геометричні характеристики зразка:

діаметр перерізу зразка $d = \text{_____} \text{ см}$

момент інерції перерізу $I = \text{_____} \text{ см}^4$

момент опору перерізу $W = \text{_____} \text{ см}^3$

відстань від опор зразка до точок прикладання навантаження $a = \text{_____} \text{ см}$

Продовження додатка А

3. Журнал спостережень

№№ зразка	Величина навантаження $2F$ кг	Згинаючий момент M , кг см	Напруження σ_{max} , МПа	Кількість циклів N
1				
2				

4. Результати випробувань:

Межа витривалості за результатами випробувань

$\sigma_{-1} =$ _____ МПа

Довідникове значення межі витривалості $\sigma_{-1}^c =$ _____ МПа

Похибка експерименту

$\delta = \left| \sigma_{-1} - \sigma_{-1}^c \right| / \sigma_{-1}^c \cdot 100\% =$ _____

Роботу прийняв «____» _____ р.

Керівник _____

Лабораторна робота № 10
Визначення питомої ударної в'язкості сталі

Мета роботи _____

Випробування виконуються на машині _____

Вихідні дані

1. Схема випробувальної машини

2 Зразок для випробувань

2. Геометричні характеристики зразка:

ширина перерізу зразка

$b = \text{_____} \text{ см}$

висота перерізу

$h = \text{_____} \text{ см}^4$

площа перерізу

$A = \text{_____} \text{ см}^3$

3. Результати випробувань

№№ зразка	Робота руйнування $W, \text{ кг см}$	Ударна в'язкість $d, \text{ кг см/см}^2$	Ударна в'язкість $\kappa \text{ Дж/м}^2$
1			
2			
3			

Продовження додатка А

Середня питома ударна в'язкість за результатами випробувань

$d =$ _____ кДж/м²

Матеріал зразка - _____

Роботу прийняв « _____ » _____ р.

Керівник _____

Додаток Б Механічні характеристики матеріалів

Таблиця Б.1 Механічні характеристики деяких сталей

Матеріал	Марка	Межа		Відносне подовження ε	Відносне звуження ψ	Твердість за Брінелем НВ	Ударна в'язкість КС кДж/м ²
		текучості σ_t , МПа	міцності σ_{max} , МПа				
Сталь вуглецева: звичайної якості	Ст. 2	220	340... 420	0,31	—	140	
	Ст. 3	240	380... 470	0,25.. 0,27	—	—	
	Ст. 4	260	420... 520	0,23.. 0,25	—	—	
	Ст. 5	280	500... 620	0,19...0,21	—	—	
Сталь вуглецева: якісна	30	290	480	0,21	0,5	179	300... 400
	35	310	520	0,20	0,45	187	250... 350
	40	320	570	0,19	0,45	217	260... 300
	45	340	600	0,16	0,40	241	200... 300
	50	350	630	0,14	0,40	241	250... 300
Сталь хромиста	40х	800	1000	0,10	0,45	217	600
	50х	900	1100	0,08	0,40	229	400
Сталь хромонікелева	40ХН	800	1000	0,11	0,10	207	700
	50ХН	900	1100	0,09	0,08	207	500

Таблиця Б.2 - Механічні характеристики деяких чавунів

Матеріал	Марка	Межі міцності, МПа при					Стріла прогину (м) при відстані між опорами 0,6 м	Твердість за Брінелем НВ	Ударна в'язкість за Брінелем НВ	Межа витривалості Мпа	
		розтягу	тиску	згині	зрізі	крученні				гладкого зразка при згині	при крученні
Модифікований чавун	сч 21	210	750	400	220	280	0,009	171... 241	90	100	80
	сч 24	240	850	440	300	300	0,009	190... 220	90	120	100
	сч 28	280	1000	480	350	350	0,009	170... 240	100	140	110
Ковкий чавун	кч 30-3	200	—	490	280	340	—	160	80	120	110
	кч 33-8	210	—	530	290	345	—	160	130	130	120
	кч 35-10	220	—	570	300	350	—	150	140	140	130

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Методические указания к выполнению лабораторных работ по сопротивлению материалов: Харьков. ин-т инж. год. хоз-ва ; сост.; В. П. Пустовойтов, Г. Е. Петушков, Ю. М. Смолянинов и др. – Харьков: ХИИГХ, 1991. – 80 с.
2. Сопротивление материалов / Под ред. Г. С. Писаренко. – 5-е изд. – Киев: Высш. шк. - 1986.
3. Цурпал И. А. Сопротивление материалов: лабораторные работы И. А. Цурпал, Н. П. Барабан, В. М. Швайко. – 2-е изд. – Киев : Высш. шк., 1988.
4. Шутенко Л. М. Опір матеріалів: навч.-метод. посіб. до лабораторних робіт / Л. М. Шутенко, В. П. Пустовойтов, М. А. Засядько – Харків: ХНАМГ, 2004. – 79 с.

Навчальне видання
Методичні вказівки
до лабораторних робіт
з навчальних дисциплін

«ОПІР МАТЕРІАЛІВ» «ТЕХНІЧНА МЕХАНІКА» і «ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА»

*(для студентів 2-3 курсів денної і заочної форм навчання бакалаврів за
напрямами підготовки 6.060101 - Будівництво, 6.060105 - Гідротехніка
(фахове спрямування «Водні ресурси»), 6.170202 - Охорона праці, 6.050702 -
Електромеханіка)*

Укладачі: ЗАСЯДЬКО Микола Андрійович
СЕРЕДА Наталія Василівна
ШПАЧУК Володимир Петрович
КУЗНЕЦОВ Олександр Миколайович

Відповідальний за випуск *А. О. Гарбуз*
За авторською редакцією

Комп'ютерне верстання *М. А. Засядька*

План 2017, поз. 150 М

Підп. до друку 06.06.2017
Друк на ризографі
Тираж 50 пр.

Формат 60/84/16
Ум. друк. арк. 1,6
Зам. №

Видавець і виготовлювач:
Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова,
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002
Електронна адреса: rectorat@kname.edu.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:
ДК 5828 від 11.04.2017